



**ESTUDIO DEL EFECTO DEL ACEITE DE MOTOR USADO, EN LA  
RESISTENCIA A CORTE Y CBR DE LOS SUELOS FINOS (MH) EN LA CIUDAD  
DE CALI**

Presentado por,

**JAIME DANIEL MONCAYO BASANTE**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA**

**SANTIAGO DE CALI**

**2018**



**ESTUDIO DEL EFECTO DEL ACEITE DE MOTOR USADO, EN LA  
RESISTENCIA A CORTE Y CBR DE LOS SUELOS FINOS (MH) EN LA CIUDAD  
DE CALI**

Presentado por,

**JAIME DANIEL MONCAYO BASANTE**

Trabajo de grado para optar el título de,

**INGENIERO CIVIL**

Director,

**Prof. MANOLO ADOLFO GALVÁN CEBALLOS, PhD**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA**

**SANTIAGO DE CALI - COLOMBIA**

**JULIO, 2018**

**Nota de aceptación:**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Manolo Galván Ceballos  
Director del Programa Académico de  
Ingeniería Civil

\_\_\_\_\_  
Jurado

\_\_\_\_\_  
Jurado

\_\_\_\_\_  
Manolo Galván Ceballos  
Director trabajo de grado

\_\_\_\_\_  
Ciudad y fecha

## **RESUMEN:**

La presente investigación tiene como objetivo profundizar en el análisis de propiedades que influyen en la resistencia mecánica de un suelo típico de la ciudad de Cali, y así mismo observar la variación de su comportamiento cuando este suelo es sometido bajo el efecto de diferentes cantidades de aceite de motor usado (AMU).

Para el desarrollo de este proyecto, en primera instancia se adquirió un suelo que tuviese una clasificación de un suelo típico de subrasante en la ciudad de Cali, según el “Sistema Unificado de Clasificación de Suelos” (USCS) Limo de alta plasticidad (MH) para esto se realizó la curva granulométrica y se evalúa el índice de plasticidad del suelo. Después mediante el ensayo de CBR se obtiene de manera indirecta el módulo de resiliencia  $M_r$ ; posteriormente mediante el ensayo de consolidación se halla de manera indirecta la permeabilidad  $k$  y en última instancia se realizan ensayos de corte directo para encontrar la cohesión efectiva  $C'$  y ángulo de fricción interna efectivo  $\phi'$ . Para el suelo en estado natural y bajo la acción de diferentes cantidades de AMU (4%, 8%, 12% y 16%) Dosificación hecha respecto al peso seco.

Al final no se logró obtener una relación directamente proporcional en cuanto a CBR y ensayos de corte directo, pero, se puede apreciar que el comportamiento mecánico de dicho suelo cambia al estar en contacto con el AMU y se estimaron fórmulas a partir de la aproximación de gráficas, con el fin de relacionar la variación de estas propiedades respecto al cambio de la cantidad de AMU; en cuanto a permeabilidad, no presenta una variación significativa.

**Palabras clave:** Estabilización de suelos, Aceite de motor usado (AMU)

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>EL PROBLEMA. ....</b>	<b>11</b>
2.1	Descripción del problema.....	11
2.2	Formulación del problema .....	12
2.3	Objetivos .....	12
2.3.1	Objetivo general:.....	12
2.3.2	Objetivos específicos:.....	12
2.4	JUSTIFICACIÓN .....	12
<b>3</b>	<b>MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>14</b>
3.1	Antecedentes .....	15
3.2	Estado del arte .....	20
3.2.1	Resistencia al corte directo .....	20
3.2.2	Relación soporte de California (CBR) .....	21
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>24</b>
4.1	Tipo de estudio .....	24
4.2	Obtención y caracterización de materiales .....	24
4.2.1	Selección y obtención de muestras alteradas .....	24
4.2.2	Caracterización del aceite.....	27
4.3	Ensayos de laboratorio.....	28
4.3.1	Ensayo de CBR (ASTM D 1883 – 99) .....	28
4.3.2	Determinación del coeficiente de permeabilidad (ASTM D 2435 – 90).....	30

4.3.3	<i>Determinación de cohesión y ángulo de fricción (ASTM D 3080 – 98)</i> .....	33
<b>5</b>	<b>CAMPAÑA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>36</b>
<b>5.1</b>	<b>Selección de suelo y toma de muestras.</b> ....	<b>36</b>
5.1.1	<i>Toma de muestras alteradas</i> .....	36
5.1.2	<i>Gravedad específica</i> .....	36
5.1.3	<i>Curva granulométrica</i> .....	37
5.1.4	<i>Límites de Atterberg</i> .....	38
5.1.5	<i>Clasificación del suelo</i> .....	39
<b>5.2</b>	<b>Ensayos de Laboratorio</b> .....	<b>40</b>
5.2.1	<i>Ensayo Relación Soporte de California (CBR)</i> .....	40
5.2.2	<i>Ensayo de consolidación unidimensional</i> .....	46
5.2.3	<i>Ensayo de Resistencia al Corte Directo (Consolidado – Drenado)</i> .....	49
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>52</b>
<b>6.1</b>	<b>Densidad seca máxima y humedades óptimas</b> .....	<b>52</b>
<b>6.2</b>	<b>Porcentaje de CBR</b> .....	<b>55</b>
<b>6.3</b>	<b>Permeabilidad</b> .....	<b>57</b>
<b>6.4</b>	<b>Ángulo de fricción interna</b> .....	<b>59</b>
<b>6.5</b>	<b>Cohesión</b> .....	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>64</b>
<b>8</b>	<b>RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>67</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>68</b>

## LISTA DE FIGURAS

Ilustración 2-1. Disposición final de los aceites usados en Colombia (Unidad de planeación minero-energética, 2001).....	14
Ilustración 3-1 Resistencia al corte directo para diferentes aditivos derivados del petróleo (Ratnaweera, y otros, 2005).....	15
Ilustración 3-2 Incidencia del aceite en los parámetros de resistencia a corte (Khamchayan, y otros, 2007). ....	16
Ilustración 3-3, Influencia del aceite en parámetros de resistencia a corte (Nazir, 2012)....	17
Ilustración 3-4 Curva de CBR vs Porcentaje de aceite.....	17
Ilustración 3-5 Esfuerzo vs deformación para diferentes porcentajes de AMU (Del Castillo, 2014).....	18
Ilustración 3-6 Densidad seca vs humedad óptima para diferentes porcentajes de AMU (Del Castillo, 2014).....	18
Ilustración 3-7 Relación entre CBR y el módulo resiliente (Rondón Quintana, y otros, 2013).....	23
Ilustración 4-1, Zonificación geotécnica de Cali (INGEOMINAS, 2002).....	25
Ilustración 4-2, Determinación de la gravedad específica del aceite .....	28
Ilustración 4-3, Ensayo de penetración.....	30
Ilustración 4-4, Curva de Taylor para un suelo natural MH (Del Castillo, 2014).....	33
Ilustración 4-5, Envolvente de esfuerzos para un suelo SM (Valencia, 2014).....	35
Ilustración 5-1, Ubicación lugar de procedencia del suelo .....	36
Ilustración 5-2, Determinación de la gravedad específica.....	37
Ilustración 5-3, Granulometría del material .....	38
Ilustración 5-4, Ensayo de Casagrande.....	38
Ilustración 5-5, Límite Líquido .....	39

Ilustración 5-6, Carta de plasticidad .....	40
Ilustración 5-7, Curvas de Densidad seca vs Contenido de humedad .....	41
Ilustración 5-8, Gráfico de expansiones para 56 golpes .....	42
Ilustración 5-9, Expansión vs contenido de AMU y contenido de humedad .....	43
Ilustración 5-10, Curvas de Densidad seca vs Contenido de humedad (8% AMU) .....	44
Ilustración 5-11, Curvas de CBR vs Contenido de humedad (8% AMU) .....	44
Ilustración 5-12, Curva de Porcentaje de expansión vs Contenido de humedad .....	45
Ilustración 5-13, CBR de diseño .....	45
Ilustración 5-14, Método de compactación, anillo de corte .....	49
Ilustración 5-15, Envoltentes de esfuerzo cortante .....	51
Ilustración 6-1, Resultados de compactación .....	52
Ilustración 6-2, Humedades respecto a la cantidad de AMU .....	54
Ilustración 6-3, Saturación en tanques para 16 % de AMU .....	55
Ilustración 6-4, Variación del CBR respecto al porcentaje de AMU .....	56
Ilustración 6-5, Caja de consolidación para 16% de AMU .....	58
Ilustración 6-6, Relación de vacíos vs % AMU .....	59
Ilustración 6-7, Variación del ángulo de fricción respecto a la cantidad de AMU .....	60
Ilustración 6-8, Análisis del ángulo de fricción interna .....	61
Ilustración 6-9, Variación de la cohesión respecto a la cantidad de AMU .....	62



## LISTA DE TABLAS

Tabla 4-1, Características de los aceites de motor usado en Colombia (Unidad de planeación minero-energética, 2001) .....	27
Tabla 5-1 Resultados de la prueba de Gravedad específica .....	37
Tabla 5-3, Porcentaje de expansión (8% AMU).....	42
Tabla 5-4, Resultados de CBR y Módulo de Resiliencia .....	46
Tabla 5-5, Densidades secas y humedades de ensayo Consolidación unidimensional .....	47
Tabla 5-6, Resultados de permeabilidad.....	48
Tabla 5-8, Velocidades de falla .....	50
Tabla 13, Resumen de Conclusiones.....	66

## 1 INTRODUCCIÓN

El buen desempeño de una obra civil depende a la respuesta mecánica del suelo en el que esta sea apoyada, entre otras, para esto, es fundamental conocer sus propiedades y con base a estas elaborar un diseño capaz de soportar todas las solicitaciones que pudieran presentarse, por este motivo se debe tener en cuenta las variables necesarias, utilizadas en las fórmulas de diseño, que se obtienen, a partir de ensayos de laboratorio.

En la presente investigación se determina la incidencia de un material en el comportamiento mecánico de un suelo típico de subrasante, siguiendo la metodología realizada por Del Castillo, 2014, donde plantea que el Aceite de Motor Usado (AMU) podría ser un buen material estabilizante, porque, por sus propiedades y consistencia tendría la capacidad de repeler el problema de infiltraciones de agua, sin embargo, durante el desarrollo de este proyecto, no se obtienen ciertos parámetros de resistencia del suelo, que suelen ser muy usados en el diseño de Cimentaciones y Pavimentos.

Este proyecto se hace con el fin de estudiar el comportamiento mecánico de un suelo, haciendo énfasis en las propiedades de resistencia del material, utilizando ensayos donde la muestra se encuentre limitada por un espacio físico, ya que, en obra la subrasante nunca está confinada, dichos ensayos son: Relación soporte de California (CBR) y Resistencia al Corte directo (Ángulo de fricción interna y Cohesión); el primero muy utilizado en la elaboración de pavimentos flexibles y el segundo ampliamente usado en el cálculo de muros y de cimentaciones superficiales.

Investigaciones previas han encontrado un ligero incremento en el ángulo de fricción interna en arcillas cuando son sometidas a la acción de hasta un 12% de Aceite de Motor, produciendo un aumento más significativo en dicha propiedad para adiciones mayores 16%; por otra parte la cohesión se reduce significativamente para el 4% y para porcentajes mayores tiene un decrecimiento substancial (Khamehchiyan, y otros, 2007). En otra investigación se confirma una disminución paulatina respecto a adiciones de hasta el 10% de Aceite de Motor usado sobre un suelo laterítico de Nigeria (Ojuri, y otros, 2012).

Dado que los suelos en el sur de Cali típicos de subrasantes, por lo general son suelos finos, vale la pena estudiar estas propiedades, para cuantificar su variación y compararla con las investigaciones anteriores y de esta manera pronosticar si es adecuado el uso de un AMU en la construcción, como tal.

## 2 EL PROBLEMA.

**Problema:** No se cuenta con las variables necesarias para establecer un diseño de pavimento, por eso, se pretende analizar el comportamiento mecánico de un suelo fino, típico de subrasante, sometido al efecto del aceite de motor usado (AMU).

### 2.1 Descripción del problema.

En toda obra constructiva de infraestructura vial, es de vital importancia garantizar la estabilidad y durabilidad del pavimento, ya que, a lo largo de toda su vida útil éste no solo se verá afectado por las continuas e intensas cargas producidas por los vehículos, sino que también, por la constante afectación ambiental que pudiese producirse. Para garantizar dicha durabilidad, se debe contar con un diseño apropiado, este diseño solo se puede lograr a partir de las propiedades de resistencia de los suelos, que se encuentran por medio de ensayos mecánicos.

En la investigación previa (Del Castillo, 2014), se trabajó con un material que, por sus propiedades hidrofóbicas, pretende repeler el problema de infiltraciones de agua, dicha investigación se proyectó para ser aplicada en un pavimento, sin embargo, en dicho proyecto, no se tuvo en cuenta las variables de diseño para una estructura de este tipo (Módulo de Resiliencia), que se usan para determinar el espesor de sus capas (Carpeta asfáltica, Base-Subbase).

El problema más directo sobre una estructura a causa de un suelo permeable se refleja en los pavimentos. Cuando el agua se filtra a través del suelo de la subrasante, genera cambios en la humedad y variación en el volumen de este. De esta manera, la filtración del agua no permite el adecuado funcionamiento estructural, causa inestabilidad y el deterioro tanto de sus propiedades mecánicas como de su vida útil (Gil, 2005). Por este motivo se trabaja con un suelo de subrasante y se pretende analizar las propiedades de resistencia que más inciden en el diseño de una estructura.

Este trabajo pretende continuar con la evaluación de un material, utilizado en investigaciones pasadas (Del Castillo, 2014) y determinar, si algunas de sus propiedades resistivas, presentan un cambio significativo y de esta manera pronosticar, la forma de realizar un diseño.

## **2.2 Formulación del problema**

¿Cómo analizar el comportamiento mecánico de un suelo fino al ser mezclado con aceite de motor usado (AMU)?

## **2.3 Objetivos**

### **2.3.1 Objetivo general:**

Analizar el comportamiento mecánico del suelo (MH), sometido a la acción del aceite de motor usado (AMU)

### **2.3.2 Objetivos específicos:**

- Caracterizar el tipo de suelo.
- Determinar de forma indirecta la permeabilidad del suelo bajo el efecto de AMU.
- Evaluar la incidencia del AMU en la resistencia a corte del suelo, así como, las propiedades que la componen.
- Determinar a partir de ensayos estáticos (CBR) el módulo de resiliencia del suelo, al ser afectado por AMU.

## **2.4 JUSTIFICACIÓN**

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de la circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la

seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.

- Debe presentar una regularidad superficial tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influyen en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico. (Fonseca, 2002).

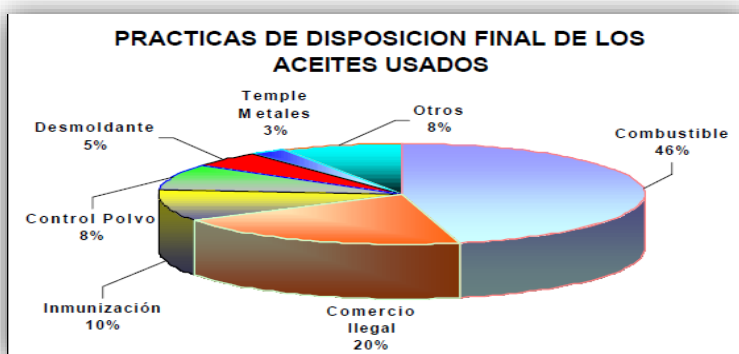
Para cumplir los requisitos ya mencionados, hay que elaborar un diseño capaz de resistir las sollicitaciones que el nivel de tránsito le exija, complementario a esto, se debe hacer un buen análisis de costos y durabilidad, que garantice el menor desgaste y pueda prever demoras en el tránsito que se pueden producir por trabajos de repavimentación y conservación. En este caso en particular se evalúa la resistencia del suelo, por lo tanto, solo se profundiza en el diseño estructural del pavimento.

El método de diseño para pavimentos flexibles (AASHTO, 1986) Contempla como segunda variable de diseño: “Subrasante”, para ser más preciso, habla del Módulo Resiliente que esta posee, para mayor precisión este valor se debe obtener por medio del ensayo Triaxial, pero, la normativa también contempla aproximaciones que se hallan a partir de correlaciones teniendo en cuenta, la variable: % CBR; esta segunda opción es utilizada en la mayoría de diseños locales, porque, la disponibilidad de los equipos para realizar pruebas triaxiales se encuentra limitada, además representa un ahorro.

Si bien es cierto que el enfoque de este trabajo de grado está orientado Pavimentos no está por demás profundizar en la variable Resistencia que se produce cuando el suelo está bajo el efecto del Aceite de motor usado, en investigaciones pasadas (Del Castillo, 2014), se evaluó la resistencia a compresión confinada, ensayo que da una buena aproximación para determinar una posible capacidad portante, pero, teniendo en cuenta que cuando se trabaja en construcción: el suelo, generalmente no se encuentra completamente confinado, resulta interesante evaluar el comportamiento en una prueba en la cual la muestra esté confinada; ya que, hay suelos con minerales volcánicos (Cenizas) Que varían significativamente su resistencia dependiendo del confinamiento.

Ya que en un futuro se podría profundizar en la incidencia del AMU en el comportamiento del suelo, orientado a otro tipo de cimentaciones (Cimientos corridos y Losas), se realiza el ensayo de Corte Directo, ya que, es un ensayo que confina la muestra por medio de una carga normal que se distribuye generando un esfuerzo sobre ella y evalúa propiedades de resistencia del suelo como son: Ángulo de fricción interna y Cohesión, propiedades que, usando el Método General De Capacidad Portante, garantizan un diseño en el cual la carga de colapso calculada a partir de un campo de esfuerzo admisible de forma estática satisface todas las condiciones de esfuerzo límite estén en equilibrio; y que ninguna infringe el criterio de falla: siempre es menor o como máximo igual a la carga de colapso (Chen, y otros, 1991).

Por otro lado, sin ser objetivos principales en esta investigación; se desea controlar la influencia negativa del agua en construcciones civiles (Problemas de contracción y expansión), teniendo en cuenta que: El aceite de motor usado es un subproducto obtenido en el sector automotriz e industrial, que no es orgánico, ni biodegradable, tiene propiedades físicas como alta viscosidad y aditivos hidrófobos que pueden favorecer a la impermeabilización de un suelo (Del Castillo, 2014). Del mismo modo al ser un material altamente contaminante, se puede decir que este trabajo mitiga el impacto ambiental causado por este subproducto, ya que, en la mayoría de los casos es vertido directamente en alcantarillas; A continuación, se muestra los usos de este material.



*Ilustración 2-1. Disposición final de los aceites usados en Colombia  
(Unidad de planeación minero-energética, 2001)*

### 3 MARCO DE REFERENCIA

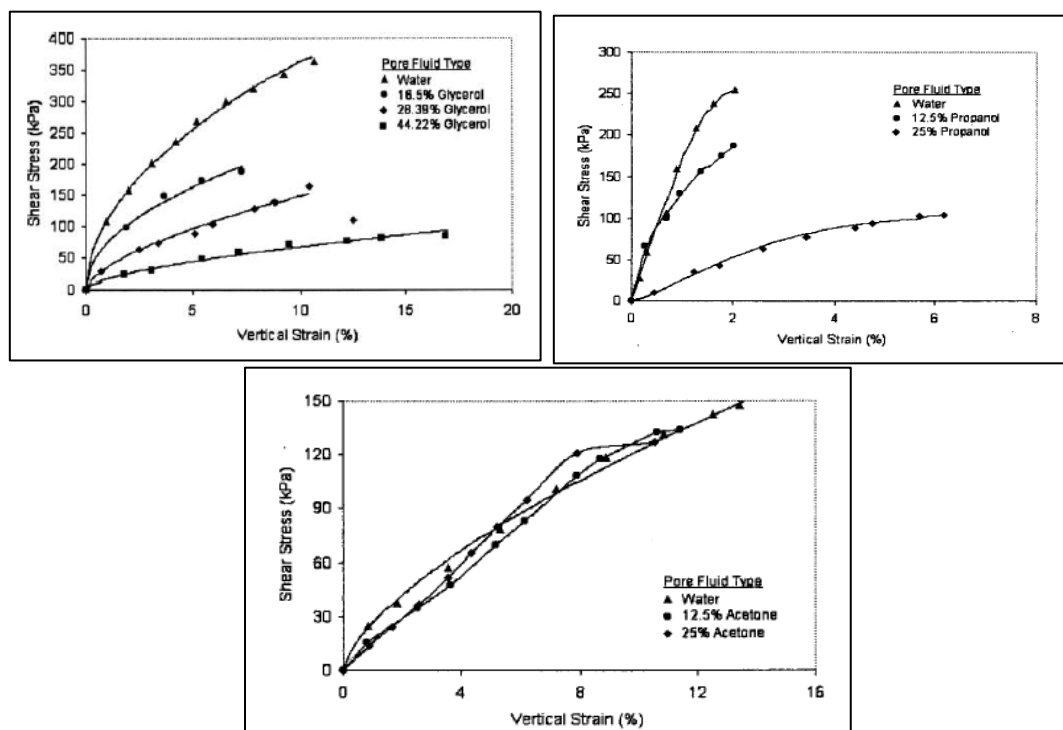
Si bien, a lo largo de las últimas décadas se encuentra pocos documentos, en los cuales, se haya trabajado utilizando Aceite de Motor Usado como “Material estabilizante”, si se encuentra en la literatura a algunos autores que han trabajado con Petróleo y algunos de sus subproductos y han estudiado la influencia de dichos materiales en el comportamiento

mecánico del suelo. A continuación, se describen algunos de los más relevantes y que van acorde con la investigación planteada en este trabajo de grado.

### 3.1 Antecedentes

- Ratnaweera y otros:

Se utilizó suelos finos, como arcillas y limos arcillosos, además suelos granulares como: Arena. Como materiales estabilizantes químicos derivados del petróleo como: Glicerina, Propanol y Acetona en proporciones hasta del 25 %, evaluando la Resistencia a la Compresión inconfiada y en cuanto a la Resistencia al Corte directo, se obtuvo una disminución para Glicerina y Propanol, cuando se usó Acetona el valor de Esfuerzo Cortante se mantuvo constante. (Ver Ilustración 3 – 1) (Ratnaweera, y otros, 2005)

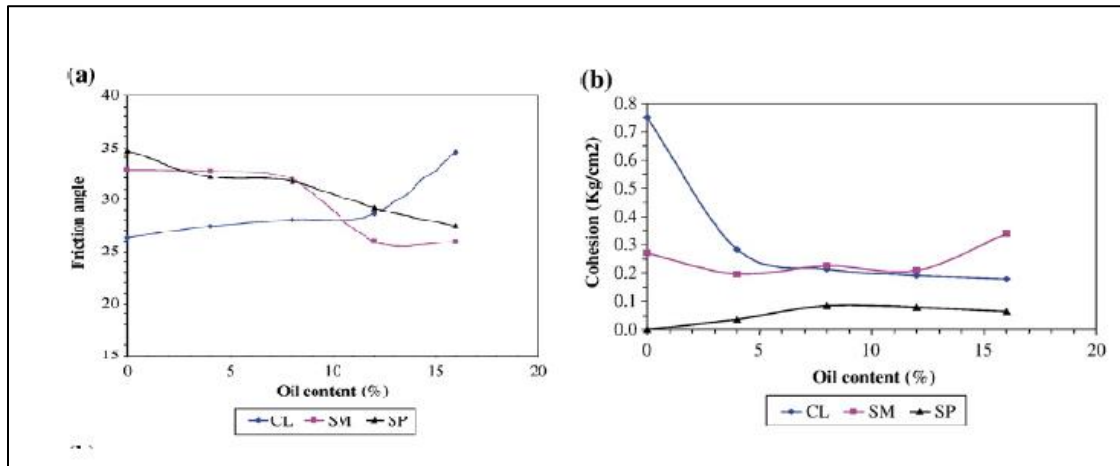


*Ilustración 3-1 Resistencia al corte directo para diferentes aditivos derivados del petróleo (Ratnaweera, y otros, 2005)*

- Mashalah Khamchyan y otros:

Se utilizó el crudo de petróleo que se derramaba sobre los suelos arenosos y arcilloso de Bushehr, Irán, adyacente al Golfo Pérsico (CL, SM y SP), Se realizaron ensayos de Resistencia a la Compresión uniaxial, Compresibilidad, Límites de

Atterberg y Resistencia al Corte directo para dosificaciones de 2%,4%,8%,12% y 16%. En cuanto a la Resistencia al Corte directo; el Ángulo de fricción interna decrece para las arenas mientras que para las arcillas aumenta y la Cohesión aparece en las arenas limosas para un porcentaje de petróleo del 16%; para las arcillas se aprecia un notable decrecimiento (Ver ilustración 3 – 2) (Khamehchiyan, y otros, 2006).



*Ilustración 3-2 Incidencia del aceite en los parámetros de resistencia a corte (Khamehchiyan, y otros, 2007).*

- Ashraf K Nazir:

Utilizó aceite de motor en arcillas sobre-consolidadas y luego evaluó el efecto a largo plazo; en primera instancia, se obtiene que Límites líquido y plástico se reducen con el incremento de aceite durante los tres primeros meses, después permanecen constantes; Por otra parte, mediante ensayos de laboratorio se encontró que la permeabilidad se incrementaba, protegiendo la contaminación, en los tres primeros meses (Nazir, 2011).

Utilizó aceite de motor en suelos colapsables de Egipto; Realizando pruebas de laboratorio, se logró estabilizar dichos suelos, de tal forma que, para la adición de aceite disminuía el potencial de colapso. Realizando Límites de Atterberg, se encontró, que estos disminuyen a medida que la presencia de aceite aumenta; Y por último mediante ensayos de Compactación, se evidencia una reducción en el Contenido de Humedad óptima, así como, la densidad seca máxima; Y mediante ensayo de Resistencia a Corte (Ilustración 3 – 3) (Nazir, 2012).



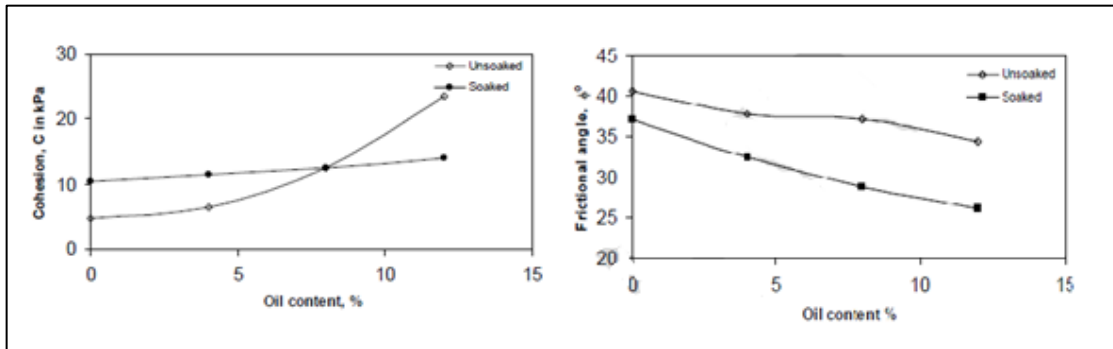


Ilustración 3-3, Influencia del aceite en parámetros de resistencia a corte (Nazir, 2012)

- Ojuri y Ogundipe:

Este estudio se realizó simulando un sitio contaminado por aceite de motor usado, donde se mezcló a diferentes cantidades: 2%, 4%, 6%, 8% y 10% con muestras de Suelo Laterítico (SC) recogidas en Akure, al sudoeste de Nigeria, realizando pruebas de ensayos Triaxiales, se determinó la Compactación, Compresión y Ensayo Soporte de California (CBR), obteniendo una disminución considerable para la Humedad óptima y Densidad seca máxima, Resistencia a la Compresión y CBR, el comportamiento de la última propiedad mencionada se describe en la siguiente gráfica (ver Ilustración 3 – 4). (Ojuri, y otros, 2012)

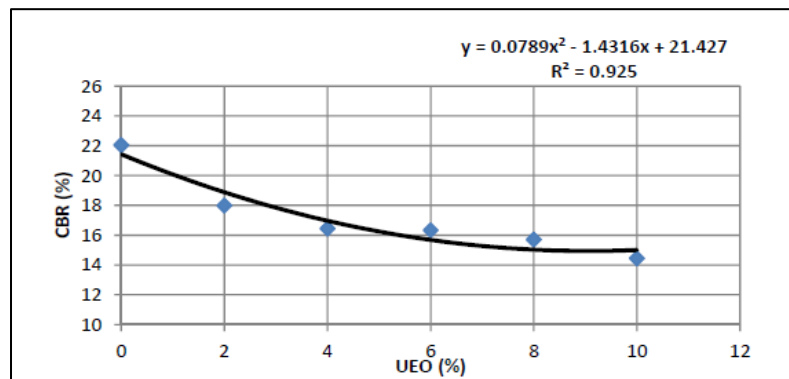


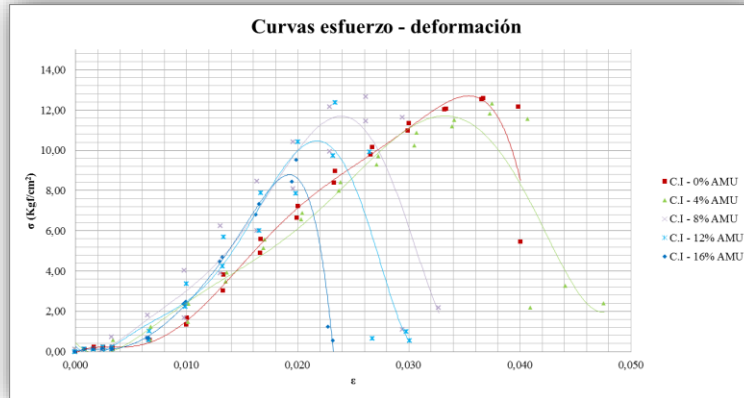
Ilustración 3-4 Curva de CBR vs Porcentaje de aceite

- Rubén Del Castillo:

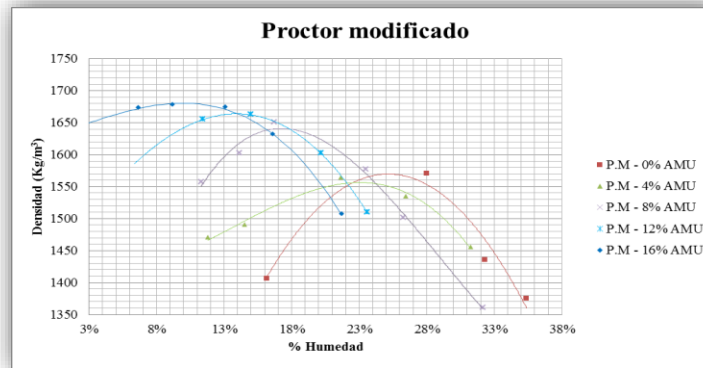
Utilizó aceite de motor usado sometiéndolo al contacto con limos de alta plasticidad y evaluó Propiedades como: Límites de Atterberg, donde, se obtuvo una disminución a mayor cantidad de aceite; La Resistencia a Compresión inconfiada

se mantuvo constante hasta 8%, después disminuyó (Ver Ilustración 3 – 5); Al realizar el ensayo de Proctor Modificado se obtuvo un incremento en la Densidad seca máxima y una disminución en el Contenido óptimo de humedad a medida de que el porcentaje de aceite aumenta (Ver Ilustración 3 – 6).

Mediante edometría y de forma indirecta, se analizó la Permeabilidad del suelo al ser sometido al efecto del AMU y se encontró que la variación es poco significativa respecto al suelo en su estado natural (Del Castillo, 2014).



*Ilustración 3-5 Esfuerzo vs deformación para diferentes porcentajes de AMU (Del Castillo, 2014).*



*Ilustración 3-6 Densidad seca vs humedad óptima para diferentes porcentajes de AMU (Del Castillo, 2014).*

*Tabla 3-1, Resumen de antecedentes*

Autores	Material estabilizante	Suelo utilizado	Comportamiento
Ratnaweera y otros (2005)	Glicerina, Propanol & Acetona	CH; MH-CH & SP	Tanto como la resistencia a la compresión inconfiada y la resistencia al corte directo disminuye, a medida que se añaden dichos materiales derivados del petroleo.
Mashalah Khamchyan y otros (2006)	Crudo de Petroleo	CL; SM; SP	El ángulo de fricción interna decrece para las arenas y aumenta para las arcillas; la cohesión se ve afectada para el 2 % de petroleo en las arcillas y aumenta para el 16 % en la arena limosa.
Ashraf K. Nazir (2011)	Aceite de motor	CH sobreconsolidado	A corto plazo límites de Atterberg se reducen y después se mantienen constantes; Permeabilidad aumenta.
Ashraf K. Nazir (2012)	Aceite de motor	Suelos colapsables de Egipto	Disminución para la densidad seca máxima y para la humedad óptima, mediante el ensayo de compactación; en cuanto al ángulo de fricción interna del suelo hay una reducción, pero, la cohesión aumenta.
Ojuri y Ogundipe (2012)	Aceite de motor usado	Suelos lateríticos	Disminución notable para resistencia a compresión inconfiada, Resistencia al corte directo y Porcentual de CBR .
Rubén Del Castillo (2014)	Aceite de motor usado	MH	Aumento para la densidad seca máxima y disminución para la humedad óptima, mediante el Ensayo de Compactación; Resistencia a la compresión inconfiada disminuye después del 8% de AMU y Permeabilidad, presenta un cambio no significatvo.

## 3.2 Estado del arte

### 3.2.1 Resistencia al corte directo

El problema de la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos puede decirse que constituye uno de los puntos fundamentales de toda la mecánica de suelos. En efecto, una valoración correcta de ese concepto constituye un paso previo imprescindible para intentar, con esperanzas de éxito, cualquier aplicación a la Mecánica de Suelos al análisis de la estabilidad de las obras civiles (Juárez Badillo, y otros, 1980).

#### 3.2.1.1 Factores que influyen en la resistencia al corte

- Esfuerzo normal

Dentro de los criterios de falla a esfuerzo cortante, cabe resaltar, que en la mayoría de casos éste falla si hay un esfuerzo normal que incide sobre él, ya que, éste provoca que la sección se vuelva más vulnerable al estar ejerciendo esfuerzo en dos planos perpendiculares. Coloumb (1776) propone la siguiente ecuación para relacionarlos.

$$\tau = \sigma * \tan\Phi$$

Ecuación 3 – 1

Donde,

$\tau$  = Esfuerzo cortante

$\sigma$  = Esfuerzo normal

$\Phi$  = Ángulo de fricción interna.

- Ángulo de fricción interna

En primera instancia Coloumb atribuyó la resistencia al corte del suelo, al ángulo de fricción interna, debido a que otorgó este fenómeno, a las leyes de fricción entre cuerpos que obedece a la mecánica clásica. Estableciendo como resultado la Ecuación 3 – 1 y diciendo que la fricción interna es una propiedad constante y única del material.

- Cohesión

Coloumb siguió desarrollando su teoría, estableciendo que la única razón para que haya esfuerzo cortante es que un esfuerzo normal se esté ejerciendo sobre la muestra, para suelos granulares, como la arena de playa que se puede deslizar a través de los dedos, pero, al analizar una arcilla, tenemos que no se desliza, de esto se deduce que existen materiales finos, de los cuales la resistencia a corte depende de la propiedad intrínseca de cada una, que se le dio el nombre de cohesión.

$$\tau = c$$

*Ecuación 3 – 2*

Pero, para los materiales que pueden contar con todas las propiedades se planteó la siguiente ecuación

$$\tau = c + \sigma * \tan\phi$$

*Ecuación 3 – 3*

- Reformulación de la ecuación

Sin embargo y después de analizar la discrepancia entre ensayos y la teoría de Coloumb, con base a muchos procedimientos experimentales, Terzaghi en 1922, determinó que el esfuerzo cortante, no depende del esfuerzo normal, sino del esfuerzo efectivo.

$$\tau = c + (\sigma - u) * \tan\phi$$

*Ecuación 3 – 4*

Donde,

u = Esfuerzo producido por el agua (Presión de poros)

Posteriormente Hvorslev, hace notar que, para arcillas saturadas, el valor de la cohesión no es constante, sino que, varía dependiendo el agua que se aloje en la muestra.

$$\tau = f(w) + (\sigma - u) * \tan\phi$$

*Ecuación 3 – 5*

### 3.2.2 Relación soporte de California (CBR)

El CBR (California Bearing Ratio) es un índice de resistencia de los suelos que se determina mediante la norma INV E – 148 y se emplea para evaluar la resistencia potencial

de materiales de subrasante, subbase y base, incluyendo materiales reciclados para empleo en pavimentos de carreteras y pistas de aterrizaje. El valor de CBR obtenido de este ensayo forma parte integral de varios métodos de diseño de pavimentos flexibles (INVIAS, 2007).

Los métodos de diseño de pavimentos utilizan como parámetro mecánico para caracterizar la subrasante, el módulo resiliente (MR). En Colombia este parámetro se obtiene en el laboratorio empleando equipos triaxiales cíclicos sobre suelos inalterados o sobre materiales compactados, siguiendo los lineamientos especificados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2007). El módulo resiliente (con periodo de reposo entre ciclos de carga) y es un parámetro de gran importancia cuando en el diseño de pavimentos se realiza por métodos mecanicistas. Para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en un pavimento, al utilizar este parámetro del comportamiento de la subrasante se supone como si fuera un material elástico lineal. Como en la práctica es de difícil determinación experimental el cálculo de esta variable de estado, ya sea por falta de equipos o definición acertada de trayectorias de esfuerzo, lo que se hace es correlacionarla con el valor de CBR a través de ecuaciones empíricas. (Rondón Quintana, y otros, 2013)

La AASHTO en su método de diseño de pavimentos flexibles (AASHTO, 1986), relaciona el CBR con el módulo de resiliencia y a partir de este con ayuda de nomogramas, determina el espesor de cada una de las capas que lleva la estructura, de esta manera establece la importancia de este valor en el diseño de un pavimento.

Módulo resiliente de la subrasante: La base para la caracterización de los materiales de subrasante en este método, es el módulo resiliente o elástico. Este módulo se determina con un equipo especial que no es de fácil adquisición y por tal motivo se han establecido correlaciones para determinarlo a partir de otros ensayos. Heukelom y Klomp, han encontrado una relación entre el MR medido en campo y el CBR de laboratorio para la misma densidad. (Fonseca, 2002)

$$MR\left(\frac{kg}{cm^2}\right) = 100 * CBR \wedge MR\left(\frac{lb}{pulg^2}\right) = 1500 * CBR$$

*Ecuación 3 – 6*

Sin embargo, existen otros autores que a lo largo de las últimas décadas han establecido sus propias correlaciones, partiendo del punto de que no todos los suelos se comportan de igual manera, a continuación, se presentan las ecuaciones obtenidas.

$$MR(psi) = 5409CBR^{0.711}$$

*Ecuación 3 – 7 (Green y otros, 1975)*

$$MR(MPa) = 14CBR \text{ para } CBR < 10\%$$

*Ecuación 3 – 8 (Uzan y otros, 1977)*

$$MR(MPa) = 17,6CBR^{0,64} \text{ para } CBR < 12\%$$

Ecuación 3 – 9 (Powell y otros, 1984)

En el 2003 Reyes, propone una ecuación recomendada para utilizar en el Método Racional para Bogotá D.C. del IDU y la Universidad de los Andes (2002):

$$MR(MPa) = 5CBR$$

Ecuación 3 – 10

Así como estas, se pueden encontrar muchas ecuaciones similares en la literatura, pero, para este caso solo se aplica la Ecuación 3 – 6, ya que, es la recomendada por el método AASHTO, sin embargo, Rondón Quintana y otros, proponen una gráfica para poder evidenciar las diferentes correlaciones que pueden darse entre estas dos propiedades (Ver Ilustración 3 – 7)

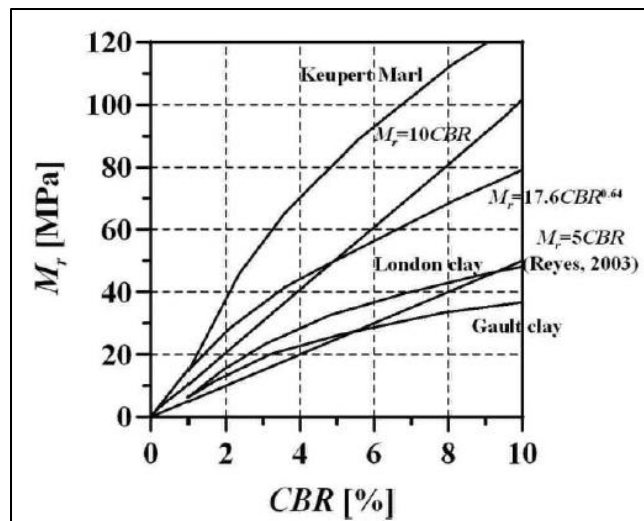


Ilustración 3-7 Relación entre CBR y el módulo resiliente (Rondón Quintana, y otros, 2013)

## **4 METODOLOGÍA**

### **4.1 Tipo de estudio**

Para la realización de este proyecto se dará seguimiento a la metodología ya planteada por (Del Castillo, 2014), establecida en su proyecto de grado, por lo tanto, se está hablando de una investigación exploratoria donde se quiere evaluar la incidencia del aceite de motor usado (AMU) en un suelo fino (MH). Suelo escogido por Del Castillo, porque, se trata de un material típico en la subrasante del sur de Cali. Esta investigación se hará siguiendo el siguiente procedimiento.

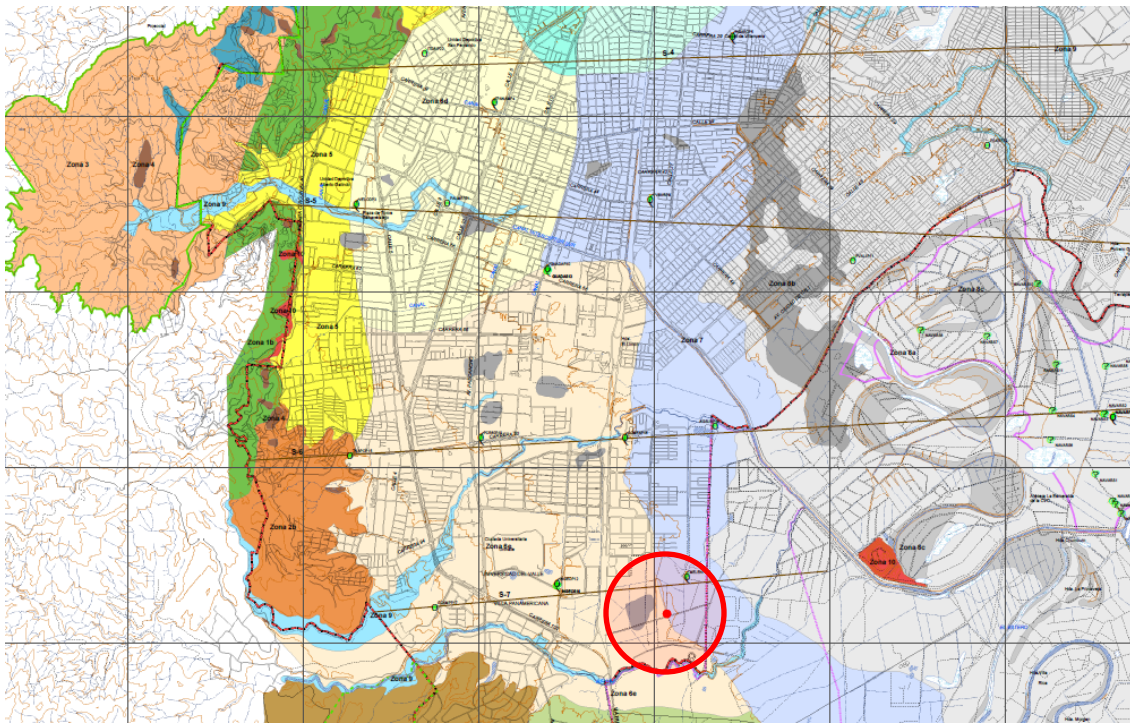
### **4.2 Obtención y caracterización de materiales**

#### **4.2.1 Selección y obtención de muestras alteradas**

La extracción de suelo se realiza al sur de la ciudad de Santiago de Cali en el barrio Valle de Lili. Con base a estudios anteriores y a la microzonificación sísmica de Cali, y aspectos preliminares cualitativos, se determinó que dicha zona es la mejor para extraer un suelo idóneo que coincidía en su mayor parte con las propiedades mecánicas de un suelo típico de subrasante, en el sector sur de la ciudad.

La zona de extracción del suelo, según la zonificación geotécnica de Cali es la 6e (Abanico de Meléndez y Lili) y zona 7 (Transición abanicos – Llanura) Ilustración 4 – 1, ya que se caracteriza por la presencia de una capa superficial de materiales limosos de consistencia dura de unos 10 m de espesor suprayaciendo a estratos granulares con cantos, gravas y bloques de rocas diabásicas de formas angulares a subredondeadas. Se compone principalmente por materiales MH, CH y ML superficialmente, donde cerca del 18% de las muestras corresponden a suelos granulares con un promedio de 24% de grava y 32% arena (INGEOMINAS, 2002).





*Ilustración 4-1, Zonificación geotécnica de Cali (INGEOMINAS, 2002)*

#### **4.2.1.1 Caracterización de las muestras**

Se pretende caracterizar las muestras, con el fin de corroborar que el suelo extraído, sí sea similar con el que se trabajó en el proyecto anterior, según la USCS (MH), de esta manera establecer el dato comparativo y seguir con la metodología que se procede a especificar. Para esto se realizan tres pruebas para clasificar el material.

- Gravedad específica – Método del picnómetro (AASHTO T – 100)

La gravedad específica es una variable que se utiliza para encontrar el índice de vacíos de un suelo; usando los valores de peso unitario y porcentaje de humedad, posteriormente a partir de este índice de vacíos se puede por medio de la prueba edométrica calcular la permeabilidad.

Este procedimiento se realiza siguiendo las especificaciones de la norma INV E – 128, con este método se busca encontrar el peso específico de los suelos y se desarrolla en un matraz, con el fin de encontrar el volumen de agua que desplaza una cantidad de masa de sólidos, introducida en él. La gravedad específica se calcula de la siguiente forma:

$$G_s = \frac{K * W_s}{-W_b + W_a + W_s}$$

*Ecuación 4 – 1*

Donde,

$K$ : Factor de corrección por temperatura.

$W_s$ : Peso de los sólidos.

$W_a$ : Peso del matraz más agua a temperatura del ensayo.

$W_b$ : Peso del matraz más agua y sólidos a temperatura del ensayo.

- Curva granulométrica mediante USCS (ASTM D 854 – 00)

Para este ensayo se sigue la especificación técnica de las normas INV E – 123 e INV E – 124, se procede tomando una muestra del suelo fino, secándola al horno y después lavándola a través de un chorro de agua sobre el tamiz No 200, hasta que el chorro se vea limpio; la cantidad retenida es secada al horno y pesada nuevamente. Después de esto el suelo seco pasa por una serie de tamices y de esta forma se determina la curva granulométrica hasta el tamiz No 200.

- Límites de consistencia (ASTM D 4318- 00)

También llamados límites de Atterberg son usados en el “Sistema de clasificación de suelos” porque, no es suficiente clasificación, comprobar que el 50% de la muestra es pasa tamiz No 200.

Estos límites se hallan de acuerdo con los ensayos de las normas INV E - 125 e INV E – 126; donde se dice que el suelo a analizar debe ser secado al aire y haber pasado por el tamiz No 40.

Para el límite líquido se coloca la muestra de suelo en un recipiente y se mezcla con 20 mililitros de agua con una espátula, se hace adiciones de 3 ml hasta formar una pasta uniforme y de consistencia dura, se coloca una cantidad de esta solución sobre la cazuela de Cassagrande y se comprime y se extiende con la espátula hasta nivelarla, posteriormente se divide el suelo en dos con el ranurador curvo trapezoidal. Finalmente se deja caer la cazuela a una velocidad de dos caídas por segundo y se contabiliza el número de golpes, en el cual la muestra se une por un espacio de media pulgada, la humedad obtenida a los 25 golpes representa el Límite Líquido.

Para el límite plástico se toman 20 gramos de la muestra y se añade agua, hasta que se pueda formar una esfera con dicho suelo, luego se toman ocho gramos y se moldea un rollo con la palma de la mano, el cual debe tener aproximadamente tres milímetros de diámetro. El contenido de humedad, al cual el rollo presenta fisuras sin desmoronarse, es el límite plástico.

Al final el índice de plasticidad se obtiene al realizar la diferencia de los límites ya mencionados.

$$IP = LL - LP$$

*Ecuación 4 – 2*

#### 4.2.2 Caracterización del aceite

El aceite se adquiere en un taller que se dedica a la extracción y reciclaje de dicho material, por medio de investigaciones previas se conoce que la mayoría de aceites presentan las propiedades mostradas a continuación.

*Tabla 4-1, Características de los aceites de motor usado en Colombia (Unidad de planeación minero-energética, 2001)*

<b>Características</b>	<b>Automotor</b>
Viscosidad a 40 °C, SSU	97-120
Gravedad 15.6 °C, °API	19-22
Peso Específico a 15.6 °C	0.9396-0.8692
Agua, % Vol.	0.2-33.8
Sedimentos, % Vol.	0.1-4.2
Insolubles en Benceno, % peso	0.56-33.3
Solubles en gasolina, % vol.	2.0-9.7
Punto de ignición, °C	78-220
Poder Calorífico, MJ/kg	31.560-44.880

Por motivos de costo la gravedad específica del aceite de motor usado no se halló siguiendo la norma ASTM D – 1298, se encuentra por medio de una probeta, donde se obtiene el volumen para diferentes pesos de aceite y por el secado en horno se sabe que el aceite no contiene agua. La relación entre peso y volumen para el aceite se asume como peso específico relativo de los sólidos, ya que el peso específico del agua generalmente se toma como 1 g/cm<sup>3</sup> De esta manera por medio de la siguiente ecuación, se obtiene el peso específico (Gs) De este aceite.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

Ecuación 4 – 3: Relación volumétrica de gravedad específica

Donde,

$\gamma_s$ : Peso específico de los sólidos

$\gamma_w$ : Peso específico del agua = 1 g/cm<sup>3</sup>



*Ilustración 4-2, Determinación de la gravedad específica del aceite*

Siguiendo con la línea investigativa previa, se realizará pruebas de CBR, Consolidación unidimensional y Resistencia a corte directo, para diferentes dosificaciones de aceite, 4%, 8%, 12% y 16% con base al peso seco del suelo.

### **4.3 Ensayos de laboratorio**

#### **4.3.1 Ensayo de CBR (ASTM D 1883 - 99)**

Para realizar el ensayo de CBR (California Bearing Ratio) en suelos finos, primero se verifica que todo el material pase el tamiz No 4 y, además, esté seco al aire; después, se debe realizar un procedimiento similar al de compactación con el método del proctor, esto con el fin de medir la expansión del suelo al ser sumergido por cuatro días bajo el agua. Por medio de este procedimiento se determina de manera directa la humedad óptima y la densidad seca máxima para el suelo y para las diferentes dosificaciones de AMU, más adelante se utilizarán estos valores para estudiar otras propiedades; ya que, se llevarán las muestras a condiciones óptimas, para comparar el efecto del aceite en el suelo.

El ensayo para determinar el CBR se hace con base a la norma INV E – 148. Para esto se toma mínimo nueve muestras de 7000 gr cada una y se dividen en tres grupos, cada una se compacta en un molde CBR a diferentes humedades, cinco diferentes capas con la energía del proctor modificado a 12, 16 y 56 golpes, para cada grupo de muestras; después de la compactación, se enraza hasta el borde se pesa el recipiente y se extrae un testigo representativo de humedad (Norma INV E – 122)

Debido a que el proceso de compactación se hace para 56 golpes, con un martillo de 10 libras, a una altura de 18 pulgadas; en un molde de cinco pulgadas de alto por seis pulgadas de diámetro; se determina mediante este método la densidad seca máxima y la humedad óptima del suelo, con ayuda de las fórmulas que se muestran a continuación.

$$\% w = \frac{A - B}{B - C} * 100$$

*Ecuación 4 – 4*

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \% w}$$

*Ecuación 4 – 5*

Donde,

A: Masa del recipiente y del suelo húmedo.

B: Masa del recipiente y el suelo seco.

C: Masa del recipiente.

$\gamma_d$ : Masa unitaria seca.

$\gamma_h$ : Masa unitaria húmeda.

$\% w$ : Humedad de la muestra con base en la masa seca del suelo en el horno.

Posteriormente estas muestras compactadas se sumergen en agua y se les coloca una platina vástago con pesas, se mide su deformación vertical inicial y al cabo de cuatro días se mide una deformación final, con este cambio se halla el hinchamiento de la muestra; luego, el molde se extrae del agua para que se escurra por un tiempo mínimo de dos horas, después se hace el ensayo de penetración.

En el ensayo de penetración, se libera el vástago y no las pesas, ya que, estas deben hacer presión durante el ensayo, se monta en el dial medidor y se penetra la muestra con un pistón

de tres pulgadas cuadradas de área, a medida que la prueba se desarrolla se registran los valores de fuerza y la deformación que se produce, este ensayo se realiza con una velocidad de 50 milésimas de pulgada por minuto. A continuación, se obtiene el valor de CBR con ayuda de las gráficas especificadas por la norma y por medio de las siguientes fórmulas.

$$\%CBR(0.1) = \frac{\sigma(0.1)}{1000} * 100 \quad \%CBR(0.2) = \frac{\sigma(0.2)}{1500} * 100$$

*Ecuación 4 – 6.*



*Ilustración 4-3, Ensayo de penetración*

### **4.3.2 Determinación del coeficiente de permeabilidad (ASTM D 2435 – 90)**

Existen varios métodos que nos permiten calcular este coeficiente, que bien pueden ser: ensayos de laboratorio, ensayos in situ, o métodos indirectos o empíricos. Para este caso por motivos de equipo de laboratorio y ahorro de tiempo, la mejor idea, es emplear el método indirecto, mediante el ensayo de consolidación unidimensional que sea hace con base a la norma INV E – 151.

#### **4.3.2.1 Método a partir de la curva de Taylor**

El ensayo de Consolidación unidimensional tiene como objetivo la reducción de volumen de una muestra mediante su expulsión de agua, al ser sometida a un incremento de carga, se puede medir el flujo del líquido a través de la misma y a partir de este principio se puede calcular la permeabilidad de forma indirecta.

Durante el ensayo de consolidación se supone un flujo unidimensional, validez de la Ley de Darcy y coeficiente  $k$  de permeabilidad constante. Se calcula entonces el coeficiente de permeabilidad con la siguiente ecuación (Del Castillo, 2014)

$$k = c_v * \gamma_w * \frac{a_v}{1 + e_0}$$

*Ecuación 4 – 7*

Donde,

$C_v$  = Coeficiente de consolidación.

$\gamma_w$  = Peso específico del agua.

$k$  = Coeficiente de permeabilidad.

$a_v$  = Coeficiente de preconsolidación o compresibilidad.

$e_0$  = Índice de vacíos antes de sufrir el proceso de consolidación para un incremento de carga dado.

Las propiedades expresadas anteriormente se calculan dependiendo el cambio en la deformación vertical que sufre la muestra, después de aumentar el esfuerzo ejercido en ella y con ayuda de las siguientes ecuaciones se obtiene el valor que corresponde a cada variable, como se describe más adelante.

- índice de vacíos

$$e_0 = \frac{(h_0 * A) - W_s / G_s}{W_s / G_s}$$

*Ecuación 4 – 8*

Donde,

$h_0$  = Altura inicial de la muestra.

$A$  = Área de la muestra.

$W_s$  = Peso de las partículas sólidas.

$G_s$  = Gravedad específica del suelo.

- Coeficiente de compresibilidad

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p}$$

*Ecuación 4 – 9*

Donde,

$\Delta e$  = Cambio de la relación de vacíos, inicial y final.

$\Delta p$  = Cambio en el incremento de carga.

- Coeficiente de consolidación

$$C_v = \frac{T * H^2}{t}$$

*Ecuación 4 – 10*

Donde,

$T$  = Factor de tiempo (0,848) para el 90% de la consolidación primaria.

$H$  = Para una muestra doblemente drenada, es igual a la mitad de la altura promedio de la muestra durante la aplicación del incremento de carga dado.

$t$  = Tiempo en segundos para el correspondiente factor de tiempo  $T$ , es decir  $t_{90}$ .

Y para determinar el  $t_{90}$ , se procede de manera gráfica, estableciendo las curvas de D.W. Taylor en un plano cartesiano; en primer lugar, se grafica las deformaciones en las abscisas y la raíz cuadrada del tiempo en el eje de las ordenadas. Después, se traza una línea recta (Línea negra) en las primeras lecturas que estén acorde con una tendencia lineal. De igual forma se traza otra línea horizontal (Línea roja) donde ha ocurrido el 100% de la consolidación primaria. Se toma el valor de las ordenadas, donde las líneas se crucen y se incrementa en un 15%; posteriormente se traza otra recta (Línea verde) desde este punto hasta que se intercepte con la línea negra. Finalmente, el tiempo de intersección correspondiente al intersección de la línea verde con la curva de Taylor es el  $t_{90}$  (Del Castillo, 2014).



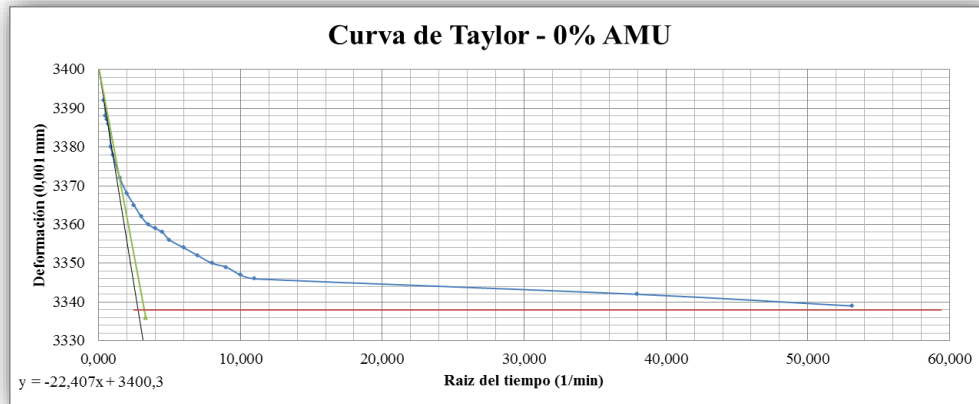


Ilustración 4-4, Curva de Taylor para un suelo natural MH (Del Castillo, 2014)

#### 4.3.3 Determinación de cohesión y ángulo de fricción (ASTM D 3080 – 98)

Este procedimiento, se puede realizar a través del ensayo de corte directo que se basa en la norma INV E – 154. Y de esta manera se desarrolló un ensayo de corte consolidado drenado (CC), ensayo donde se garantiza que la muestra ya haya presentado su consolidación primaria y que los esfuerzos de la parte líquida no son tenidos en cuenta, ya que por eso la muestra se drena.

Para obtener los parámetros mencionados anteriormente, lo primero que se debe determinar es el tiempo de corte mínimo, en el cual se garantice que la muestra alcance a drenar el agua que lleva retenida, con este tiempo se determina una velocidad de falla con la que actuará la máquina durante el ensayo, para hallar dichas variables, se usan las fórmulas especificadas en la normativa INV E – 154, que se muestran a continuación.

$$t_f = 50t_{50}$$

Ecuación 4 – 11

Donde,

$t_f$ : Tiempo de falla estimado

$t_{50}$ : Tiempo en el que ocurre el 50% de la consolidación primaria.

Para determinar el tiempo en el que ocurre el 50% de la consolidación primaria, se utiliza el  $T_{90}$  encontrado en el ensayo de consolidación, anteriormente citado, para esto se toma dicho valor y se entra a la curva de Taylor con el fin de encontrar una deformación  $D_{90}$ , la cual

corresponde a dicho tiempo, una vez conseguido dicho valor se aplica la fórmula mostrada a continuación, extraída de la normativa INV E – 151.

$$D_{50} = D_0 + \frac{5}{9}(D_{90} - D_0)$$

Ecuación 4 – 12

Donde,

D: Deformación para (0%, 50%, y 90%) de la consolidación primaria

Por último, se toma el valor de  $D_{50}$ , y se ingresa una vez más a la curva de Taylor para verificar el valor de tiempo que corresponde a dicha deformación, este será el  $t_{50}$ , valor que se usa para encontrar el tiempo de falla. Una vez determinado el tiempo de falla, se asume una deformación de falla de  $d_f = 4$  mm (Valor que se elige al azar, la norma sugiere 5 mm para suelos sobreconsolidados y 12 mm para suelos normalmente consolidados). Y se determina la velocidad de falla dividiendo la deformación sobre el tiempo.

Mediante este ensayo, se encapsula la muestra a analizar, y se somete a diferentes cargas normales. Posteriormente, se aplica gradualmente una fuerza cortante, la cual se incrementa hasta llevar el suelo a un estado de falla; esto se manifiesta cuando la carga aplicada empieza a disminuir o se vuelve constante; el otro criterio nos dice que la falla se presenta cuando la deformación horizontal ha excedido en 10% la longitud total (O diámetro) de la muestra. Después, se relaciona la fuerza, con el área de corte y se obtiene lo siguiente.

$$\tau = \frac{Fc}{Ac}$$

Ecuación 4 – 13

Donde,

$\tau$  = Esfuerzo de corte.

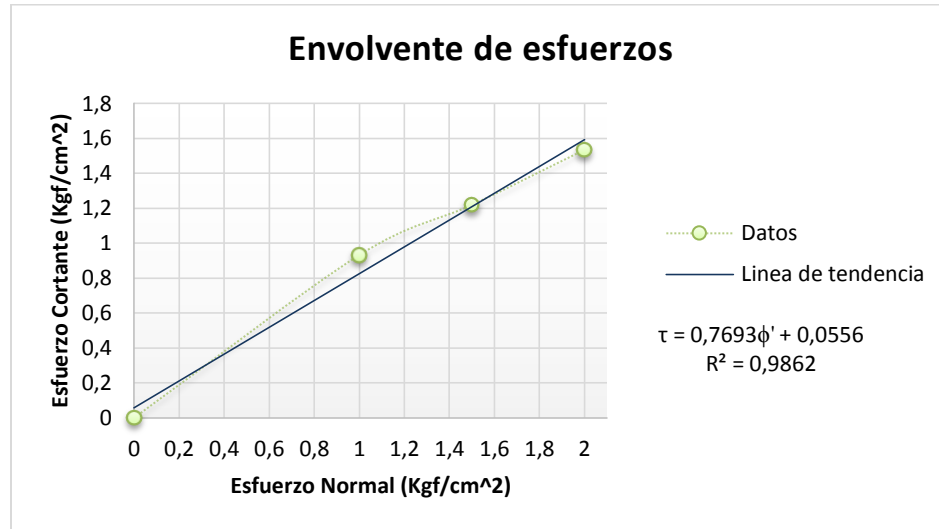
$F_c$  = Fuerza de corte.

$A_c$  = Área de corte.

El área de corte varía durante el procedimiento y se calcula teniendo en cuenta la deformación gradual que sufra la muestra durante el ensayo.

Ahora bien, teniendo en cuenta que el ensayo se realiza para tres diferentes esfuerzos normales, se determinan las propiedades: Ángulo de fricción interna y Cohesión, por medio de la gráfica de envolvente de esfuerzos, donde se tiene, en el eje de las ordenadas el esfuerzo cortante y el esfuerzo normal en el eje de las abscisas, después se agrega la línea

de tendencia a la forma dada. A partir de esta línea, encontramos que, el valor donde corta el eje (y) corresponde a la cohesión y el valor de la tangente inversa, es decir, el ángulo que forma con la horizontal es el Ángulo de fricción interna.



*Ilustración 4-5, Envolvente de esfuerzos para un suelo SM (Valencia, 2014)*

## 5 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

### 5.1 Selección de suelo y toma de muestras.

#### 5.1.1 Toma de muestras alteradas

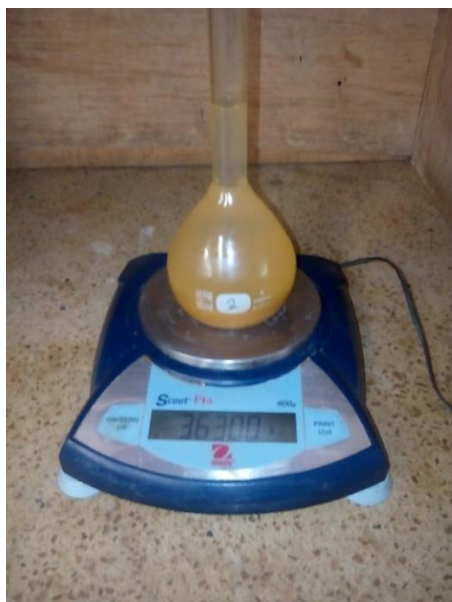
El lugar de procedencia del suelo se encuentra ubicado entre la carrera 99 con calle 48 al sur de la ciudad de Santiago de Cali, terreno perteneciente a la constructora Marval, el cual será usado para la construcción del proyecto de vivienda San Rafael, en la Ilustración 5 – 1 se muestra ubicación de la zona de extracción del material.



*Ilustración 5-1, Ubicación lugar de procedencia del suelo*

#### 5.1.2 Gravedad específica

Para la realización de este procedimiento, la muestra de suelo es seca al horno a 105 °C hasta que la masa sea constante, posteriormente dicho material es enfriado a temperatura ambiente, protegiéndolo de la humedad exterior, después se lleva al picnómetro y se pesa para obtener el peso de los sólidos, luego se llena de agua hasta la mitad y se extraen las burbujas por medio de una bomba de vacío, al final se añade agua hasta la marca y se toma su peso.



*Ilustración 5-2, Determinación de la gravedad específica*

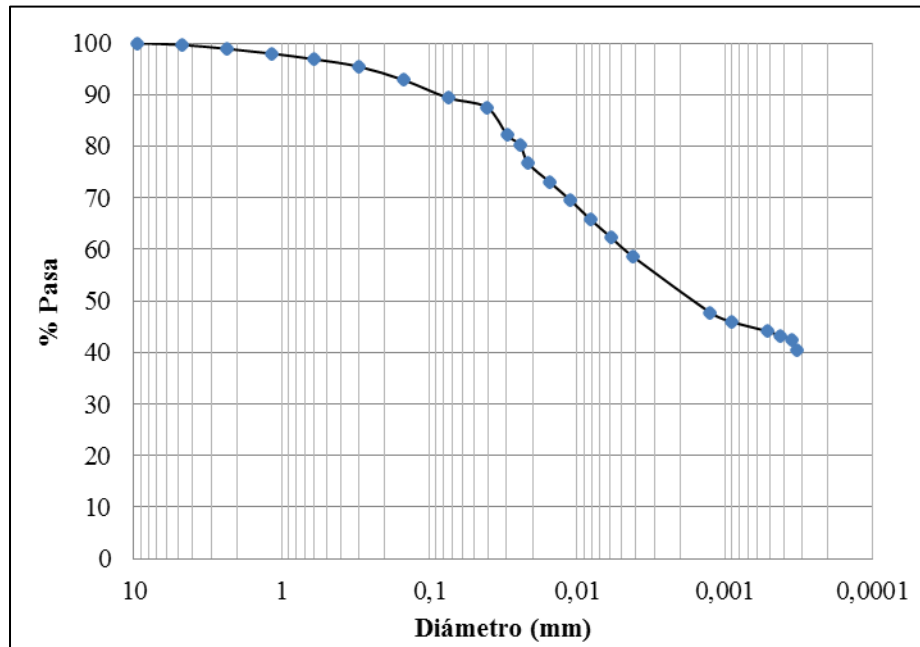
*Tabla 5-1 Resultados de la prueba de Gravedad específica*

<b>Datos muestra</b>	
<b><i>Matraz + W sólidos + Agua (g)</i></b>	363
<b><i>Temperatura Agua-Sólidos (°F)</i></b>	82
<b><i>W sólidos (g)</i></b>	31.25
<b><i>Matraz + Agua (g)</i></b>	343.43
<b><i>Temperatura Agua (°F)</i></b>	82
<b><i>Temperatura ensayo (°C)</i></b>	27,78
<b><i>Corrección K por temperatura</i></b>	0.9981

Con ayuda de la ecuación 4 – 1 se calcula un valor de  $G_s = 2,67$

### **5.1.3 Curva granulométrica**

De acuerdo con la metodología explicada en el capítulo anterior, se realizó una prueba de granulometría e hidrometría, la cual estará constituida por dos partes: una retenida sobre el tamiz de 2 mm (No.10) y otra que pasa dicho tamiz, en la Ilustración 5 – 3 se observa la gradación del suelo, del cual más del 50% del tamaño de partícula pasa el tamiz numero 200 clasificando el material como un suelo fino.



*Ilustración 5-3, Granulometría del material*

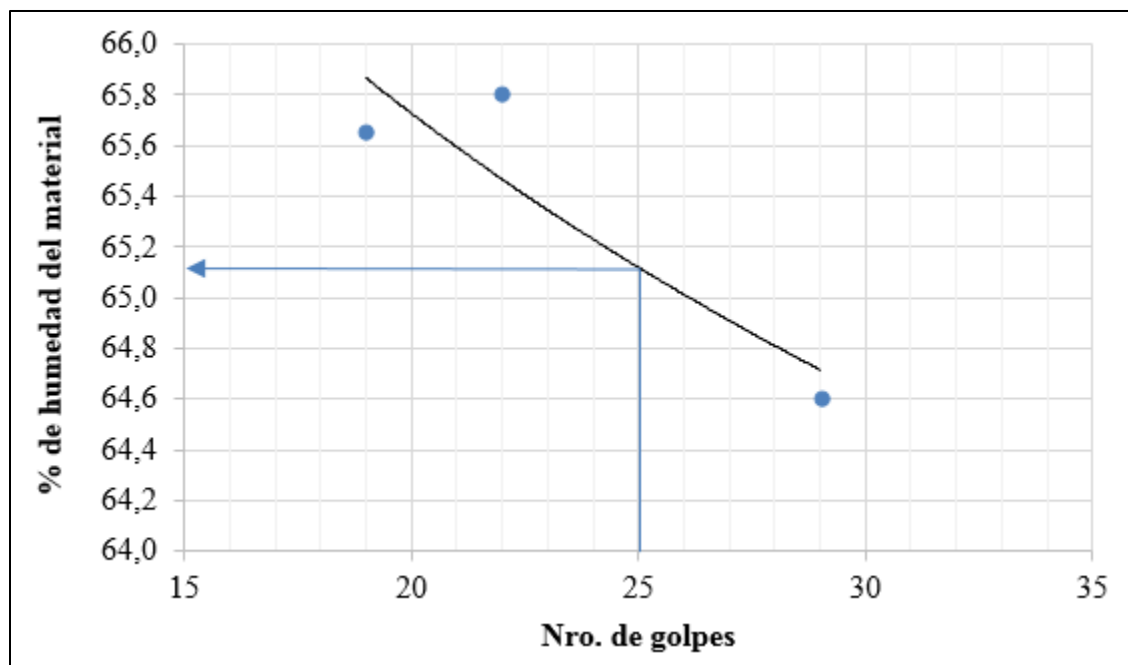
#### 5.1.4 Límites de Atterberg

El límite líquido es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico, a este nivel de contenido de agua, el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso; y el límite plástico es el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como material no plástico, en la Ilustración 5 – 4, se muestra el ensayo de Casagrande usado para calcular el límite líquido.



*Ilustración 5-4, Ensayo de Casagrande*

Para clasificar el suelo como un limo o arcilla se realizó el ensayo de límites de Atterberg. En la Ilustración 5 – 5 se observa la relación de número de golpes y la humedad del material donde se muestra que a 25 golpes el límite líquido corresponde a 65,12%.



*Ilustración 5-5, Límite Líquido*

Para la prueba del límite plástico, se procedió preparando una muestra de suelo, donde, se determinó la cantidad de agua mínima requerida para que el suelo se conserve en estado plástico, a través de la realización de pequeños rollos con dicho material, este valor fue calculado con la toma de muestras de humedad. El resultado obtenido fue un límite plástico de 32,45%. El cálculo del índice de plasticidad del suelo se realizó con la Ecuación 4 – 2. Obteniendo un valor de  $IP = 32,67\%$ .

### 5.1.5 Clasificación del suelo

Según el S.U.C.S. el suelo se clasifica como suelo fino ya que más del 50% del material pasa a través de la malla No 200. Esta clasificación del suelo da como resultado que se trata de un limo de alta plasticidad. Este sistema denota con la C a las arcillas inorgánicas, M a los limos inorgánicos y O para limos orgánicos. Además de estos otros símbolos, L para baja plasticidad con límite líquido menor que 50% y H para alta plasticidad, con límite líquido mayor que 50%

Con los valores de los límites líquidos (65.12%) y plásticos (32.45%) se obtuvo un índice de plasticidad de 32,67%. Por medio de la carta de plasticidad de Cassagrande se clasificó el suelo como un limo de alta plasticidad MH como se muestra en la Ilustración 5 – 6.

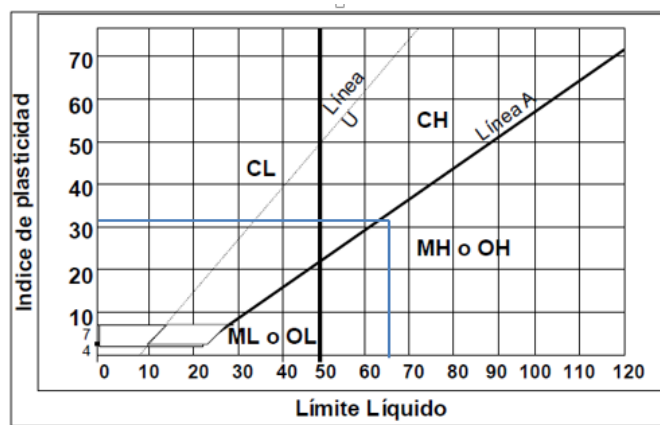


Ilustración 5-6, Carta de plasticidad

## 5.2 Ensayos de Laboratorio

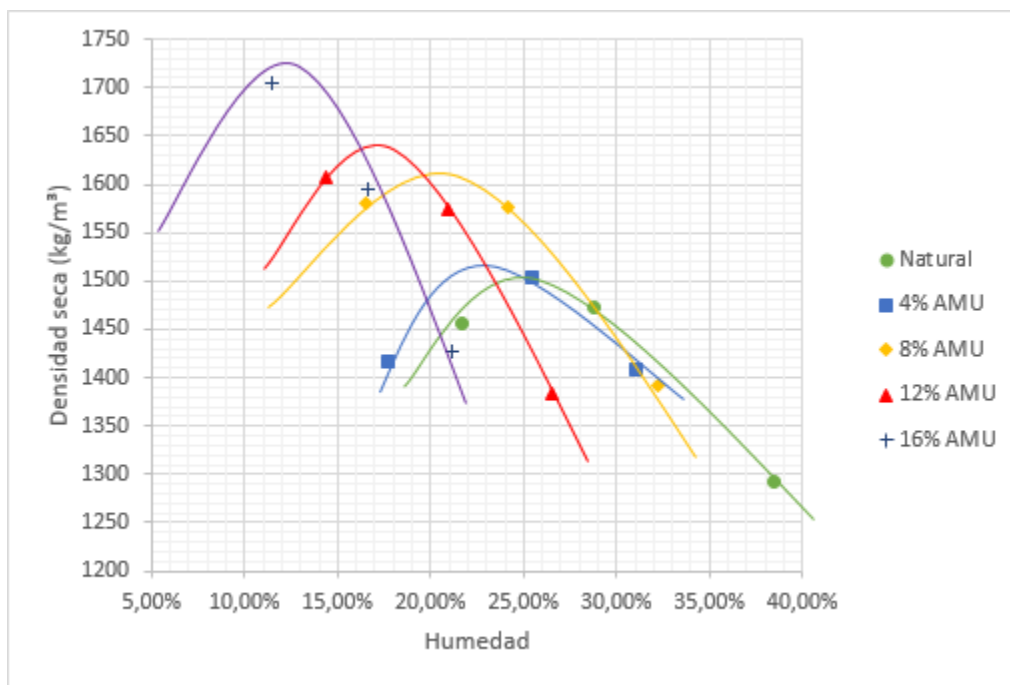
A partir de este ítem, se describe el procedimiento de los ensayos realizados y las variables obtenidas para comparar el comportamiento mecánico del suelo en su estado natural y al ser sometido al efecto del AMU.

### 5.2.1 Ensayo Relación Soporte de California (CBR)

Para este ensayo, en primera instancia se trituró el suelo hasta que el tamaño de partícula sea capaz de pasar por el tamiz No 4, posteriormente se prepararon 9 muestras en grupos de 3 y cada una se compactó a diferentes humedades en cinco capas con la energía del martillo usado en el proctor modificado, a 12 a 26 y 56 golpes.

Al utilizar la energía de compactación de 56 golpes, de forma preliminar, se realiza el ensayo de compactación y con esto se determina la densidad seca máxima y la humedad óptima de la muestra, cuando este suelo está en su estado natural, así como también para los diferentes porcentajes de aceite (Ilustración 5 – 7) con esto se determina las condiciones aproximadas con las que se realizarán los ensayos de consolidación unidimensional (Para determinar la permeabilidad del suelo) y el ensayo resistencia al corte directo (Para determinar la cohesión y el ángulo de fricción interna) los valores obtenidos se muestran a continuación.





*Ilustración 5-7, Curvas de Densidad seca vs Contenido de humedad*

Se toma el punto más alto de la curva y el corte de este con el eje “Y” representa la densidad seca máxima del material y el corte con el eje “X” el porcentaje de humedad óptima, resultados mostrados en la tabla

*Tabla 5-2, Condiciones óptimas del material*

% AMU	Densidad seca máxima (g/cm³)	Humedad óptima
0	1.51	25.00%
4	1.53	22.50%
8	1.62	20.90%
12	1.64	17.40%
16	1.72	13.40%

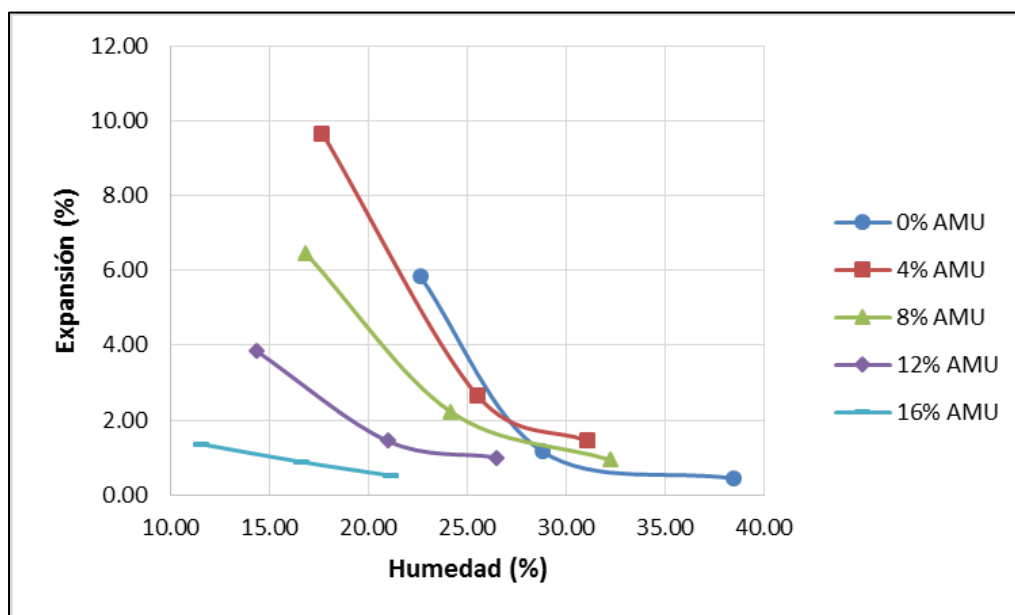
Una vez realizada la compactación del material, tal y como se describe anteriormente, se sumerge el molde en agua y con ayuda de un pistón se coloca una carga extra que consiste en dos pesas de 2,2 kg aproximadamente. Posteriormente se mide la deformación vertical que sufre la muestra al cabo de estar cuatro días sumergida, y se encuentra su relación porcentual respecto a su altura; En la tabla 5 – 3 se muestran los valores obtenidos para el

espécimen al que se le adicionó 8% de AMU (Los hinchamientos para los otros porcentajes, se muestran en Anexos).

*Tabla 5-3, Porcentaje de expansión (8% AMU)*

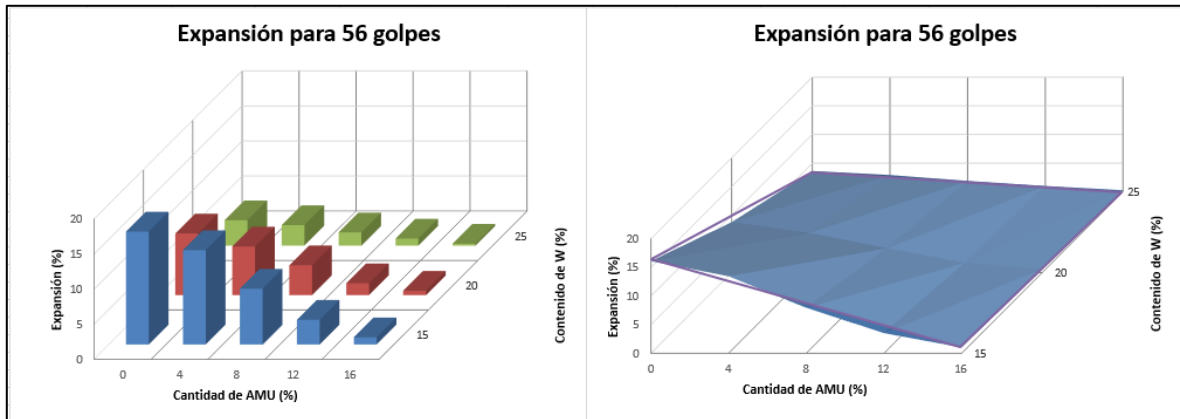
MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lectura inicial (0.001 pl)	866	880	987	1033	819	995	864	926	983
Lectura final (0.001 pl)	543	769	940	892	771	965	650	828	953
EXPANSION (%)	6.46	2.22	0.94	2.82	0.96	0.60	4.28	1.96	0.60

Para evidenciar de una mejor manera los resultados obtenidos en la tabla, se realiza una gráfica de 3 variables donde se observa el comportamiento de la expansión respecto a la cantidad de AMU; primero se toma las gráficas obtenidas únicamente para 56 golpes.



*Ilustración 5-8, Gráfico de expansiones para 56 golpes*

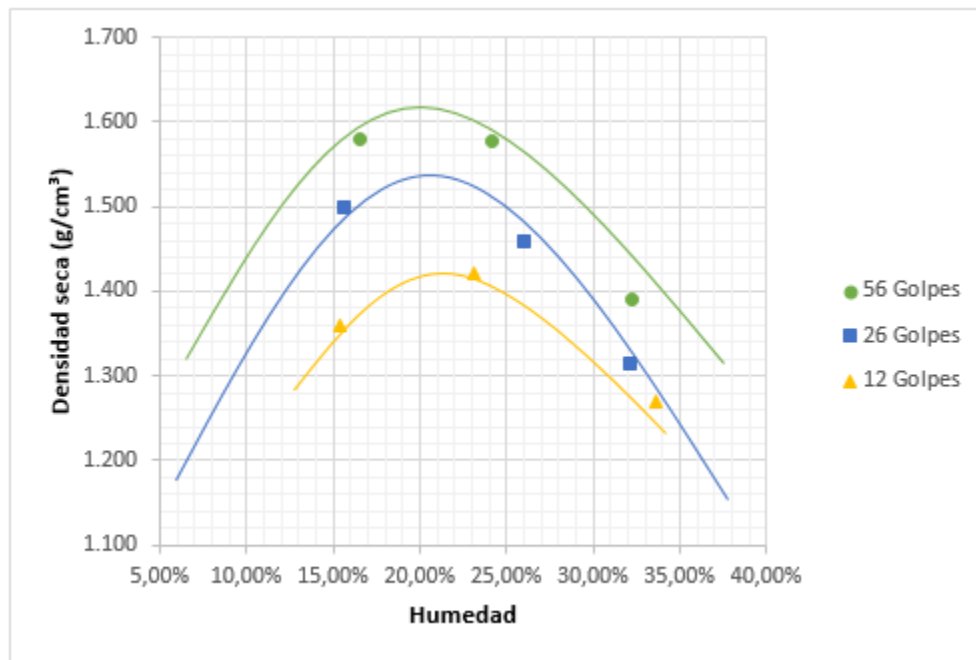
Se toman para 56 golpes solo para hacer el comparativo con una misma energía de compactación, luego se establece humedades constantes de 15 a 25 % y finalmente se hace la gráfica en 3d, obteniendo los siguientes resultados:



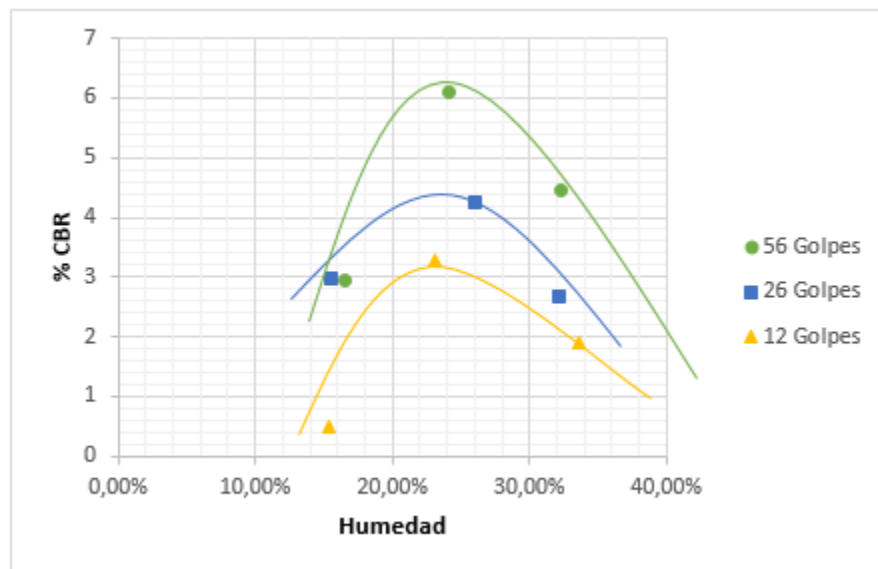
*Ilustración 5-9, Expansión vs contenido de AMU y contenido de humedad*

En la Ilustración 5 – 9 se logra apreciar dos gráficos, el primero es de un orden cualitativo para poder mirar la variación de estas variables, pero, el segundo muestra la una superficie, que por medio de una regresión lineal se trabajó como un plano el cual se comporta de la siguiente manera:  $\%Exp = - 0.586*AMU - 0.647 *W + 22.562$  con un error de  $R^2 = 0.83$ .

Después de sacar los moldes de cada uno de los tanques, se ponen a escurrir por cuatro horas, luego cada molde es penetrado por el pistón a una velocidad constante, obteniendo así una curva esfuerzo deformación, estas curvas deben corregirse cuando es necesario (Correcciones mostradas en Anexos), ya para cada gráfica se obtuvo el esfuerzo de penetración para 0,1 y 0,2 pulgadas y usando la fórmula 4 – 6, se elige el valor máximo y se obtiene el % de CBR; luego este valor se grafica respecto al contenido de humedad; posteriormente, se toman los valores de humedad para los cuales el porcentaje de hinchamiento es menor al 2 % y con estos valores cortamos las gráficas anteriormente realizadas; por último realizamos la gráfica de % de CBR vs densidad seca máxima y respecto al 90 % de esta densidad obtenemos el CBR de diseño. Lo descrito anteriormente se representa en las gráficas a continuación para el 8% de AMU (para el resto de los porcentajes ver ANEXOS).



*Ilustración 5-10, Curvas de Densidad seca vs Contenido de humedad (8% AMU)*



*Ilustración 5-11, Curvas de CBR vs Contenido de humedad (8% AMU)*

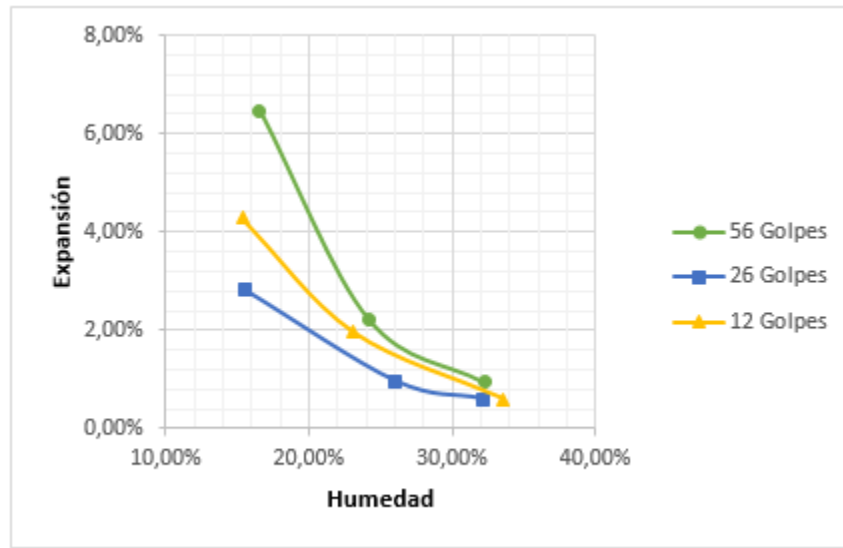


Ilustración 5-12, Curva de Porcentaje de expansión vs Contenido de humedad

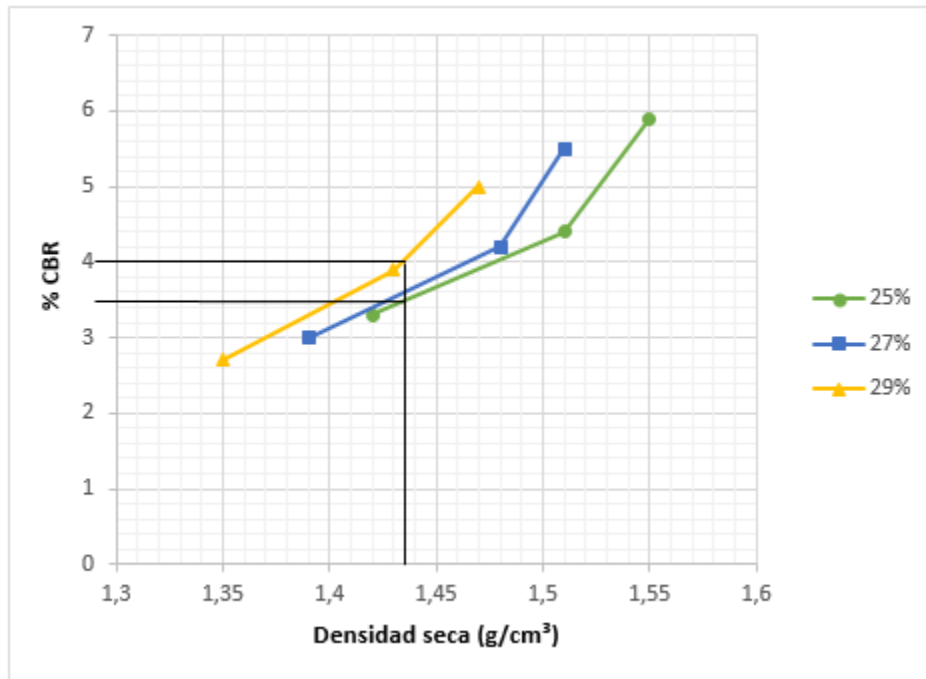


Ilustración 5-13, CBR de diseño

Posteriormente se toma el CBR de cada uno de los ensayos y se aplica la Ecuación 3 – 10 para determinar el Módulo de Resiliencia; Los resultados se alojan en la tabla 5 – 4.

*Tabla 5-4, Resultados de CBR y Módulo de Resiliencia*

Cantidad de AMU (%)	Densidad seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad óptima	Humedad mínima de trabajo	CBR (%)	MR (kg/cm <sup>2</sup> )
0	1.51	25.00%	28.80%	4.70	4.70
4	1.53	22.50%	27.00%	3.00	3.00
8	1.62	20.90%	25.00%	3.45	3.45
12	1.64	17.40%	19.00%	3.95	3.95
16	1.72	13.40%	13.40%	7.10	7.10

## 5.2.2 Ensayo de consolidación unidimensional

Como se mencionó anteriormente, este ensayo se utiliza para determinar de manera indirecta la permeabilidad del suelo, para este procedimiento se intentó llevar la muestra a su densidad seca máxima y humedad óptima. Después de tomar varios testigos de humedad, se determinó que el contenido de humedad natural del suelo en su estado natural (Humedad de equilibrio) al aire libre se encontraba alrededor de 8%; con base a este valor se calcula la cantidad de agua que se debe adicionar, para llevar el suelo a su humedad óptima, humedad obtenida el ítem 5.2.1.

La densidad seca máxima se obtuvo compactando la muestra, con la energía del proctor modificado en un molde de proctor estándar a cinco capas con 56 golpes; y luego la muestra se extrajo del molde con ayuda de la prensa universal y fue tallada en el anillo de consolidación, para posteriormente tomar su peso, conociendo la masa del anillo y dejando parte de la muestra en el horno por 24 horas, podemos determinar su densidad seca y contenido de humedad de ensayo. Se aceptó humedades que no varíen por más de 1% y densidades que estén por encima del 95% de la densidad seca máxima; los valores se representan en la siguiente tabla.

*Tabla 5-5, Densidades secas y humedades de ensayo Consolidación unidimensional*

<b>Cantidad de AMU (%)</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>
Peso anillo + muestra (g)	132,92	132,85	132,9	131,12	132,28
Peso anillo (g)	62,9	62,9	60,51	60,51	60,51
Peso muestra (g)	70,02	69,95	72,39	70,61	71,77
Peso húmedo + recpte (g)	67,93	45,59	44,2	59,72	60,15
Peso seco + recpte (g)	58,17	40,07	39,63	53,75	54,97
Peso recpte (g)	18,42	16,45	17,09	17,62	17,01
Densidad seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1,51	1,53	1,62	1,64	1,72
Densidad seca de ensayo (g/cm <sup>3</sup> )	1,46	1,47	1,56	1,57	1,64
Comparación porcentual	96,41%	95,97%	96,21%	95,69%	95,08%
Humedad óptima	25,00%	22,50%	20,90%	17,40%	13,40%
Humedad de ensayo	24,55%	23,37%	20,28%	16,52%	13,65%
Diferencia	0,45%	0,87%	0,62%	0,88%	0,25%

Después se procedió a realizar el montaje en el equipo de consolidación, el espécimen fue sumergido en agua para garantizar que no haya pérdidas de humedad durante el ensayo; posteriormente se aplicó una carga vertical, hasta que la muestra llegue a su consolidación, es decir, que no presente deformaciones verticales. Este suelo, presentó problemas de expansión y la carga que estabilizó la muestra fue de 4 kg. Luego de tener la muestra sin cambios de deformación, se duplica la carga (8 kg).

Posteriormente y con el nuevo incremento de carga, realizamos el ensayo de consolidación unidimensional, como se describe en el literal 4.3.2 y de esta manera, mediante las ecuaciones ya descritas en el ítem 4.3.2.1 se determinó la permeabilidad de forma indirecta; Resultados mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 5-6, Resultados de permeabilidad

Cantidad AMU (%)	G <sub>s</sub>	PRESIÓN Kg/cm <sup>2</sup>	ALTURA cm	H Prom. cm	H <sup>2</sup> Prom. cm <sup>2</sup>	t <sub>90</sub> Seg	Rel. VACÍOS	VARIACIÓN Rel VACÍOS	Coef. de comp. cm <sup>2</sup> /Kg	Módulo comp. cm <sup>2</sup> /Kg	Coef. cons. cm <sup>2</sup> /seg	PERMEABILIDAD cm/seg
0	2,670	4,00	2,1712				1,0903					
				1,0794	1,1651	101,40		0,0239	0,0060	0,0029	0,0097	<b>2,78237E-08</b>
		8,00	2,1464				1,0664					
4	2,458	4,00	1,8246				0,6184					
				0,9045	0,8181	101,40		0,0278	0,0069	0,0043	0,0068	<b>2,93405E-08</b>
		8,00	1,7933				0,5906					
8	2,276	4,00	1,8873				0,4645					
				0,9395	0,8827	86,4		0,012882	0,003220	0,002199	0,00866	<b>1,90495E-08</b>
		8,00	1,8707				0,4517					
12	2,120	4,00	1,8455				0,3058					
				0,91815	0,8430	86,4		0,013020	0,003255	0,002493	0,00827	<b>2,06231E-08</b>
		8,00	1,8271				0,2928					
16	1,983	4,00	1,8932				0,2032					
				0,94388	0,8909	614,4		0,006927	0,001732	0,001439	0,00123	<b>1,76988E-09</b>
		8,00	1,8823				0,1962					

La gravedad específica para los diferentes porcentuales de aceite, se halla aplicando la ecuación utilizada por (Silvestry y otros, 1997) donde, se toma el aceite como si fuese otro componente del suelo y con base a esto se calcula la gravedad específica, ya que, no se puede aplicar el método del picnómetro, por las propiedades físicas del AMU. Y se utiliza la siguiente Fórmula.

$$G_s = \frac{1}{\frac{P_1}{100 * G_1} + \frac{P_2}{100 * G_2}}$$

Ecuación 5 – 1. Gravedad específica para mezclas de suelo aceite

Donde,

$G_s$ : Gravedad específica de la mezcla de suelo aceite.

$P_1$ : Masa en porcentaje de las partículas de suelo.

$P_2$ : Masa en porcentaje del aceite.

$G_1$ : Gravedad específica de las partículas de suelo (2,670).

$G_2$ : Gravedad específica del aceite (0,844).



### 5.2.3 Ensayo de Resistencia al Corte Directo (Consolidado – Drenado)

Como en el ensayo de consolidación unidimensional, en el ensayo de resistencia a corte directo, se hizo un procedimiento similar para llevar al suelo a las condiciones ideales de densidad seca y contenido de humedad. Esta vez, después de llevar la muestra a la humedad óptima, se determina el peso exacto de muestra que debería almacenar el anillo para llegar a la densidad seca máxima; Se pesa la cantidad de muestra determinada, más 20 gramos, que se asume, se perderían durante el enrase del anillo. Como medida final, se compacta con un pistón y una pequeña porra (ver Ilustración 5 – 12). Para este ensayo no se puede compactar con la energía del proctor modificado y luego tallar la muestra del molde obtenido, porque, al compactar de esta forma a 5 capas, en cada una de ellas se puede generar una posible línea de falla, la cual puede causar menor resistencia durante el ensayo.



*Ilustración 5-14, Método de compactación, anillo de corte*

Como en el ítem anterior, solo se aceptaron humedades que no difieran del 1% con la humedad óptima y densidades secas que estén por encima del 95% de la densidad seca. En la siguiente tabla se muestra la condición más baja de los tres anillos que se hacen necesarios para realizar la envolvente de esfuerzos, resultado de un ensayo de Resistencia al corte directo.

Tabla 5-7, Densidades secas y humedades de ensayo Corte directo

Cantidad de AMU (%)	0	4	8	12	16
Peso anillo + muestra (g)	1569	1576	1575	1572	1579
Peso anillo (g)	1406	1411	1406	1406	1411
Peso muestra (g)	163	165	169	166	168
Peso húmedo + recpte (g)	87.85	36.89	62.82	62.46	90.42
Peso seco + recpte (g)	73.77	32.83	55.48	56.04	82.79
Peso recpte (g)	15.09	15.31	18.48	17.09	21.54
Densidad seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1.51	1.53	1.62	1.64	1.72
Densidad seca de ensayo (g/cm <sup>3</sup> )	1.44	1.46	1.54	1.56	1.63
Comparación porcentual	95.21%	95.75%	95.20%	95.03%	94.99%
Humedad óptima	25.00%	22.50%	20.90%	17.40%	13.40%
Humedad de ensayo	23.99%	23.17%	19.84%	16.48%	12.46%
Diferencia	1.01%	0.67%	1.06%	0.92%	0.94%

Se compactan tres muestras diferentes para cada porcentual de aceite, estas muestras se llevan al equipo de resistencia a corte, después de ser inundadas, se someten a cada una a un diferente esfuerzo normal de consolidación y se dejan consolidar por un mínimo de 24 horas para el posterior corte.

La velocidad de corte que se le aplica a las muestras, debe ser la misma para cada uno de los tres diferentes esfuerzos normales, dependiendo el porcentual de aceite obtenemos diferentes velocidades, las cuales se calcularon de la siguiente manera: con ayuda del T90 calculado en el ensayo de consolidación unidimensional y mediante la *Ecuación 4 – 12* se obtuvo el valor de  $D_{50}$ , que a su vez por medio de la gráfica arrojó el valor de  $t_{50}$ , con dicho valor se ejecutó la *Ecuación 4 – 11*, para determinar el tiempo de falla. Uno de los criterios de falla que existe para el ensayo de resistencia a corte, dicta que la muestra ha fallado cuando su deformación excede el 10% de su longitud o diámetro, es por eso, que se adoptó un valor de 4 mm y no de 5 mm como lo sugiere la norma, porque, la longitud de la caja de corte es pequeña y generalmente la falla tiende a estar a mucho menos de 5 mm de deformación.

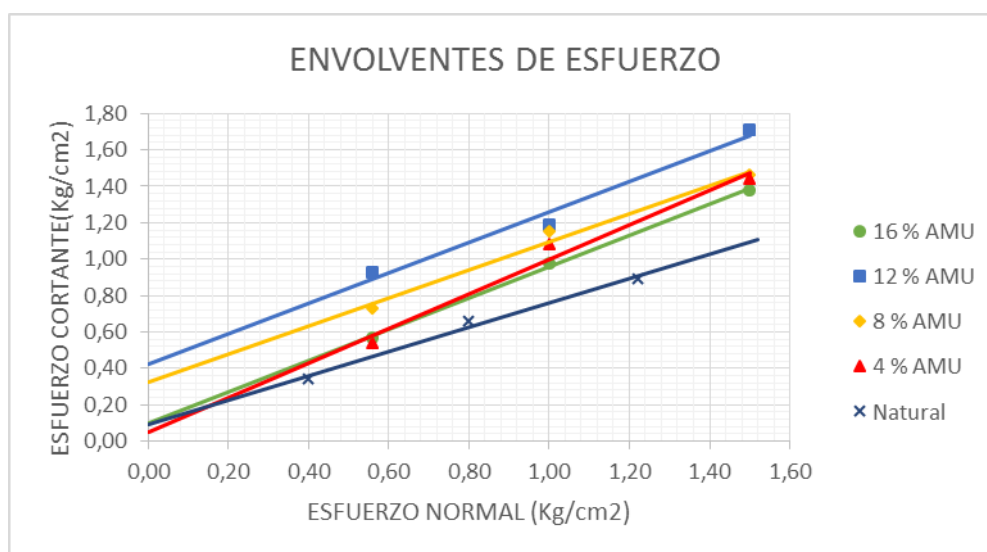
Tabla 5-8, Velocidades de falla

AMU (%)	T90 (min)	D90 (mm)	D50 (mm)	T50 (min)	TF (min)	VF (pl/min)	V aparato (pl/min)
0	1.69	211	184	0.52	26	0.00603	0.00720
4	1.69	263	226	0.52	26	0.00603	0.00720
8	1.44	118	94	0.44	22	0.00703	0.00720
12	1.44	69	53	0.44	22	0.00703	0.00720
16	10.24	68	52	3.16	158	0.00099	0.00096

Después de realizado el ensayo se obtienen unas curvas de esfuerzo vs deformación horizontal y deformación vertical vs deformación horizontal; se toma la primera curva mencionada y se extrae el valor máximo, que se asume, el esfuerzo máximo de corte, para cada uno de los ensayos.

La gráfica envolvente de esfuerzos se realiza de la siguiente manera; en el eje de las abscisas se introducen los valores de esfuerzos normales y en el eje de las ordenadas se introducen los valores de esfuerzo cortante máximo, con estos tres puntos se genera una línea de tendencia; y el ángulo que forme esta línea respecto a la horizontal, es el ángulo de fricción interna efectivo; y el intercepto de esta línea con el eje de las ordenadas, es la cohesión efectiva del suelo.

Las envolventes obtenidas por estos ensayos se muestran en la siguiente gráfica, de los cuales se extrae una tabla de cohesiones y ángulos de fricción interna.



*Ilustración 5-15, Envolventes de esfuerzo cortante*

*Tabla 5-9, Resultados de cohesión y ángulo de fricción interna*

Cantidad AMU (%)	Cohesión (kg/cm²)	Ángulo fricción interna
0	0,0898	33,2609
4	0,0868	42,0547
8	0,3248	37,1184
12	0,4254	40,5767
16	0,0992	40,4929

## 6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Densidad seca máxima y humedades óptimas

Mediante el proceso de CBR, no solo se encontró la humedad óptima de compactación, también, se determinó el valor de la humedad para que el hinchamiento sea menor al 2% de la altura total de la muestra, valor que se tiene en cuenta para determinar el CBR y en el diseño de pavimentos.

En las curvas Densidad seca vs Contenido de Humedad, se puede apreciar claramente, que tienden a desplazarse a la izquierda y hacia arriba cuando la presencia de AMU aumenta, por este motivo se puede afirmar que: A mayor contenido de aceite, la Humedad óptima disminuye y la Densidad seca máxima, aumenta. Los resultados se pueden apreciar en la Ilustración 6 – 1.

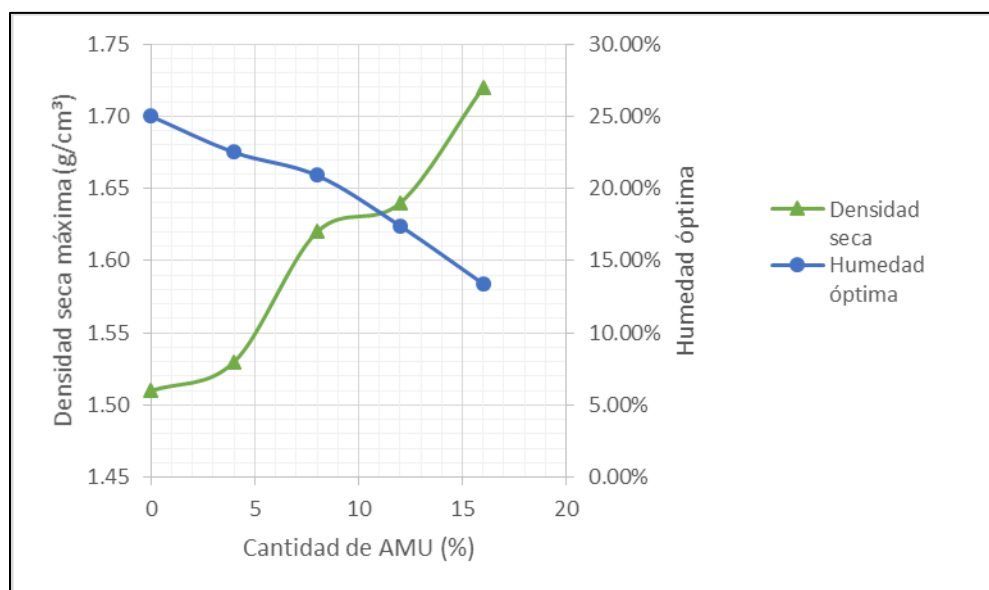


Ilustración 6-1, Resultados de compactación

De la gráfica se puede apreciar que la humedad óptima tiene un comportamiento uniforme y decrece describiendo una parábola de segundo orden:  $W_{opt} = -0,0002AMU^2 - 0,0036AMU + 0,248$ , donde la variable; por otro lado, la densidad seca máxima tiene un comportamiento que presenta una mayor variación, ya que, en el intervalo 0 – 4% y 8 – 12% de AMU el cambio no fue tan significativo como de 4 a 8% y 12 a 16% AMU; por eso se aproxima su comportamiento con una ecuación polinómica:  $\gamma_d = 4E-05AMU^4 - 0,0014AMU^3 + 0,0143AMU^2 - 0,0323AMU + 1,51$ . Ecuación que se antoja válida para valores mayores al 4% de aceite.

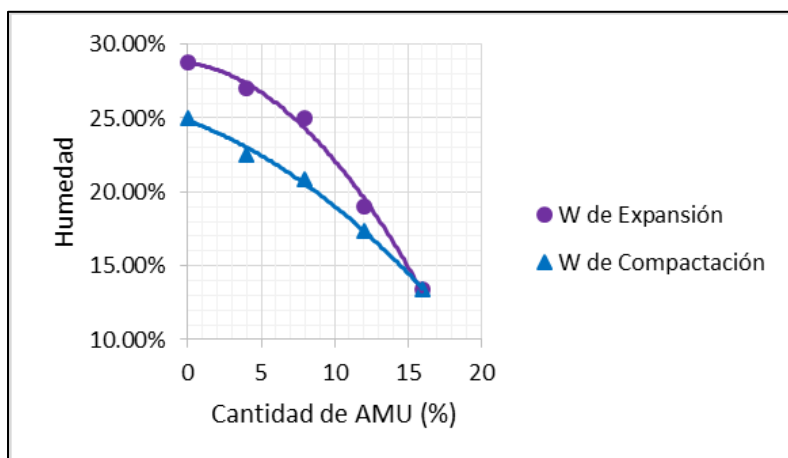
En suelos diferentes al limo de esta investigación, otros autores ( (Silvestry, y otros, 1997): (Khamsehchiyan, y otros, 2006): (Rahman, y otros, 2010): (Nazir, 2012): han encontrado resultados similares respecto a la reducción de la humedad óptima en los ensayos de compactación. Cuando el suelo se mezcla con el agua, esta cumple la función de lubricar las partículas, formando así una matriz ordenada que permite la compactación del suelo. Como se indicó antes, al aumentar el contenido de aceite, el agua necesaria para densificar el suelo es menor, es decir que el aceite reemplaza la función del agua y reacomoda las partículas de suelo permitiendo su densificación. (Del Castillo, 2014).

La composición típica de los aceites usados es una mezcla de lubricantes de diferentes tipos (Aceite usado generado por motores en la ciudad de Cali. Alternativas de uso, 2001), propiedad que hace que el aceite no solo reemplace la función del agua en el ensayo de compactación, sino que lubrique aún más las partículas reacomodándolas y creando una matriz todavía más ordenada del suelo (Del Castillo, 2014).

Partiendo de los puntos anteriores encontramos que los resultados obtenidos por Del Castillo, 2014, Silvestry, y otros, 1997, concuerdan con los resultados obtenidos en la presente investigación, ya que, en la mayoría de casos la Densidad seca máxima presenta una variación poco significativa hasta el 4 y 6% de aceite y después toma un crecimiento a medida de que la cantidad de aceite aumenta. Por otro lado Khamsehchiyan, y otros, 2007, Nazir, 2012, trabajando con suelos CL encontraron una disminución en dicha propiedad, para el primer caso, tomando crudo de petróleo como material estabilizante y en segunda instancia con aceite de motor, de todas maneras, ambas partes coinciden en que la densidad seca tiende a disminuir, porque, el material estabilizante afecta la microestructura del suelo y en ese orden de ideas la curva que se presenta en el ensayo de compactación pierde su forma de campana.

En este trabajo se plantea el AMU como material estabilizante y según la teoría de compactación: el agua es un material lubricante que permite la reacomodación de las partículas sólidas del suelo y en un estado de compactación lo vuelve más denso bajo un determinado valor de humedades y densidad seca máxima; el aceite presenta mayor viscosidad que el agua y esto puede causar que las partículas sólidas tengan una mejor distribución, y de este modo se puede atribuir esta cualidad del aceite al incremento de densidades, ya que, al lubricar de una mejor manera, la cantidad de sólidos que almacena el molde será mucho mayor a medida de que la cantidad de AMU aumente. Por otra parte la humedad óptima disminuye, porque, se está usando un aceite, el cual ocupa la fase líquida del suelo y por esta razón el contenido de agua usado para llegar las condiciones ideales es mucho menor, en comparación a un suelo en estado natural.

La humedad mínima de trabajo referida al hinchamiento se halló sumergiendo los moldes con la muestra compactada en agua durante cuatro días y con una carga estandarizada sobre ellos, la muestra que presentó una deformación igual o menor al 2% de su altura es la que se toma como base para determinar esta humedad. Luego de hallar los datos alterando la cantidad de AMU presente en la muestra, se obtuvo la siguiente gráfica.



*Ilustración 6-2, Humedades respecto a la cantidad de AMU*

En la gráfica podemos apreciar que las humedades de mínimas referidas a la expansión presentan un comportamiento similar al de las humedades óptimas, hasta el 8% de aceite y a partir de ese valor comienza a decrecer significativamente, y en los ensayos realizados para el 16% de AMU no hubo humedad que supere el 2% de hinchamiento, por este motivo las humedades se asumen iguales para este contenido de aceite.

El AMU impermeabiliza la muestra, ya que este ocupa la fase líquida del suelo, pero, no solamente hace esto, también aglutina la cantidad de agua que éste posea. El proceso de mezclado descrito en los literales 5.2 describe que el suelo primero entra en contacto con el agua y luego se añade el aceite; lo que causa que la cantidad de agua que ya ha sido mezclada, permanezca dentro de la muestra.

En el ensayo se pudo apreciar que el aceite no permite el flujo libremente de agua hacia el interior de la muestra durante el tiempo de inmersión y ya que esta no puede ingresar, no genera ningún tipo de adhesión agua/sólido en ella, por esta razón se evidencian deformaciones verticales cada vez más bajas a medida que el AMU aumenta. Para adiciones hasta del 8% el suelo aún permite la infiltración de agua, generando hinchamiento, pero, este decrece de una manera constante; para la adición del 12% el suelo se adquiere un poco más de AMU y por lo tanto inhibe las infiltraciones de agua causando deformaciones verticales cada vez más pequeñas y por eso se obtiene un notable acercamiento entre el valor de la humedad óptima de compactación y la humedad en cuestión; Por último para un porcentaje del 16% el suelo se encuentra saturado de aceite y por lo tanto bloquea el paso del agua, acción que se ve reflejada en las expansiones de este porcentual, ya que ninguna presenta una mayor al 2% (ver ANEXOS Ilustración A – 10).

## 6.2 Porcentaje de CBR

En el porcentaje de CBR se encontró una notoria variación respecto a su estado natural, se pudo ver una disminución considerable para el 4% de AMU y un incremento uniforme desde este punto hasta el 12% de aceite y finalmente un salto muy significativo para el 16% (ver Figura 6 – 4).

Para el 16 % de AMU, durante el proceso de sumersión en agua, se presentaron problemas de saturación, la presencia de aceite era tan alta que el suelo no tuvo la capacidad de retenerlo, de manera correcta y por eso se evidencia un rechazo por parte de la muestra, el aceite fue lavado y llevado a flote a la superficie, por su menor densidad. En la siguiente ilustración, se puede observar tres tanques, estos almacenaban 3 moldes con suelo que fue sometido a un porcentaje de AMU del 16%, el tanque 1 alojaba una muestra con una cantidad mínima de agua y esta fue aumentando para 2 y 3.

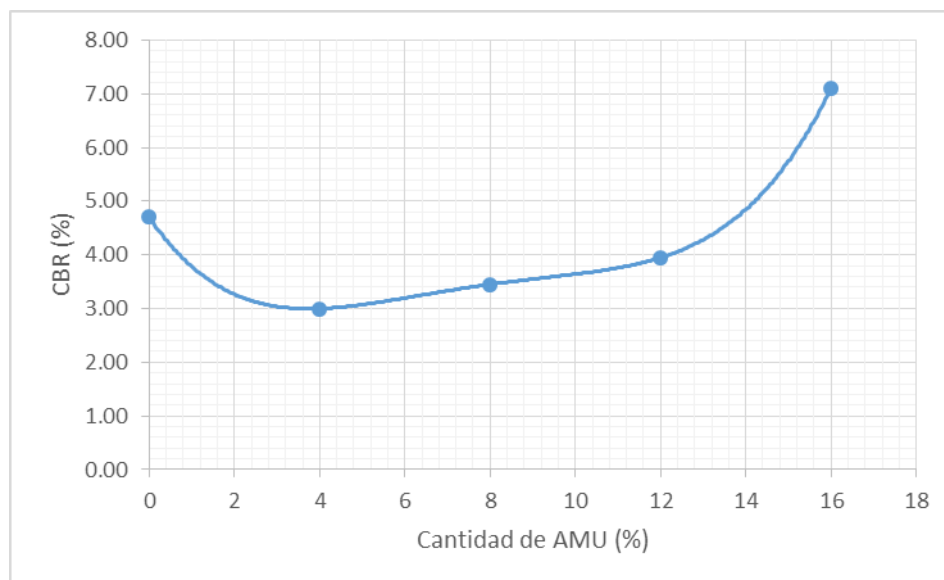


*Ilustración 6-3, Saturación en tanques para 16 % de AMU*

Como se puede apreciar en la imagen el tanque 3 presenta un mayor exceso de aceite que los tanques anteriores, esto se debe por el proceso de mezclado, el agua ocupa la parte líquida del suelo y cuando se agrega el aceite, no tiene lugar donde almacenarse, por estos excesos se lavan de la muestra y se evidencian en las imágenes, a mayor presencia de agua, mayores desperdicios de aceite.

A medida que el aceite entra en contacto con el suelo, este tiende a comportarse como si fuese un suelo granular, de esta manera, puede mejorar su tenacidad y es por eso que soporta una mayor cantidad de carga sin sufrir deformaciones considerables, de este mismo modo se puede apreciar que tiene una falla frágil y por esta razón, es considerable que mientras la muestra esté confinada, adquiera una mejor resistencia a los esfuerzos. Y así se evidencia incremento en el CBR de 16 %. Los esfuerzos soportados por el aceite en este estado, se deben también al bajo cambio volumétrico, debido al poco hinchamiento que presentó el suelo para este porcentaje, esto ocasiona que las partículas sólidas estén juntas y de esta manera puedan soportar de mejor manera los esfuerzos, como se puede apreciar en ANEXOS (Apéndice B curvas Penetración vs Deformación), el comportamiento de resistencia a la penetración para este porcentaje de AMU, se vuelve lineal y creciente,

incluso para altas deformaciones. En la Ilustración 6 – 4 se puede analizar la variación para los diferentes CBR.



*Ilustración 6-4, Variación del CBR respecto al porcentaje de AMU*

De la gráfica anterior se puede apreciar un notable decrecimiento del %CBR de 0 a 4% de AMU y un crecimiento lineal y uniforme de 4 a 12 % de AMU y por último un notable crecimiento para el 16% de AMU, crecimiento de mayor magnitud en comparación con los porcentajes anteriores. Este comportamiento se puede relacionar de una manera global con una ecuación polinómica de cuarto orden, de la siguiente manera:  $CBR = 0.000AMU^4 - 0.0238AMU^3 + 0.2674AMU^2 - 1.1625AMU + 4.7$ .

El AMU es un material contaminante, que modifica las propiedades del suelo, por eso, es de esperarse que su resistencia disminuya, ya que, no solo afecta las propiedades físicas del material, también sus propiedades químicas. Desde el punto de vista mecánico, el aceite tiene ciertas ventajas, que durante el proceso de hinchamiento se pudo constatar; el aceite de motor usado no solo funciona como un lubricante, también como aglutinante, entonces, para porcentajes adecuados de aceite, no habrá flujo de agua en el suelo (de afuera hacia dentro y viceversa), pero, para el 4 % de AMU y con base en el ensayo de consolidación, se aprecia que la permeabilidad aumenta, por esta razón obtenemos un resultado poco favorable para este porcentaje. Si bien el efecto se ve acrecentado para los primeros porcentajes, tiende a mejorar de manera lineal y se continúa desarrollando de esta forma, hasta llegar hasta 12% con la misma tendencia.

La inicial caída para el 4 % como se mencionó anteriormente, se atribuye a la escasa presencia de aceite, ya que, si está en poca cantidad no logra lubricar las partículas sólidas durante el proceso de compactación y no aglutina el agua utilizada en un principio, por eso,



se nota un ligero aumento en la permeabilidad. A medida que el aceite aumenta su capacidad de bloquear el paso de agua y su capacidad de desintegrar partículas sólidas de mayor tamaño, lo que hace que la muestra se densifique durante el proceso de compactación; debido a este comportamiento el CBR tiende a aumentar de forma lineal describiendo la siguiente ecuación:  $CBR = 0.1188AMU + 2.5167$ . Este comportamiento solo se da para este rango, ya que, aun para el 12 % de AMU hay hinchamiento, desde este punto en adelante el hinchamiento desaparece, por eso, la muestra presenta un menor cambio volumétrico, lo que ocasiona que la muestra se densifique y su permeabilidad sea mínima con relación al resto de los porcentajes de aceite.

En investigaciones pasadas, Ojuri, y otros, 2012, trabajaron con suelos lateríticos, arenas arcillosas (SC) y se observó un notable decrecimiento en cuanto al porcentaje de CBR a medida que la concentración de aceite de motor usado aumenta, valores trabajados hasta el 10%, además se añade, que esto se debe a la contaminación que produce dicho aceite en estos suelos, ya que son ricos en hierro y aluminio, y este contaminante afecta las propiedades físicas y mecánicas del material.

Aiban, 1998, trabajó con arenas y suelos contaminados de aceite al 2%, 4% y 6 % a diferentes humedades (de 0 a 10% contenido de humedad) a medida de que el agua aumenta, se obtuvieron mejorías en las muestras con 2 y 6 % de aceite y una acción desfavorable para el 4 %, en cuanto al CBR, lo que concuerda con nuestra investigación para el 4 %, si bien, es cierto que son suelos diferentes cabe resaltar que para el 4 % de aceite, el suelo se ve afectado negativamente (Aiban, 1998).

### **6.3 Permeabilidad**

En la tabla 5 – 6, se aprecia que esta variable no presenta grandes cambios, a excepción del 16 % de AMU, donde se nota una notable disminución de esta propiedad, ya que, el valor para el T90 se incrementa, esto se debe a un proceso físico ocurrido durante el ensayo, al incrementar el esfuerzo normal sobre el espécimen, el agua empieza a salir de la muestra junto con el AMU, este último presenta una mayor viscosidad y por lo tanto, tarda una mayor cantidad de tiempo en salir, y esto hace que el tiempo de consolidación sea mayor. Proceso que se ve acrecentado cuando el contenido de AMU en la muestra está en cantidades superiores, porque, el agua que se le agrega para que este suelo llegue a la humedad óptima es mínimo en comparación con el aceite.

Este fenómeno solo se ve acrecentado en la muestra con 16 % de AMU, porque, el aceite se presenta en una cantidad tan alta que el suelo no lo puede absorber de manera óptima, lo que hace que al entrar en contacto con el agua este sea lavado y por su menor densidad salga a flote a la superficie, Ilustración 6 – 3.



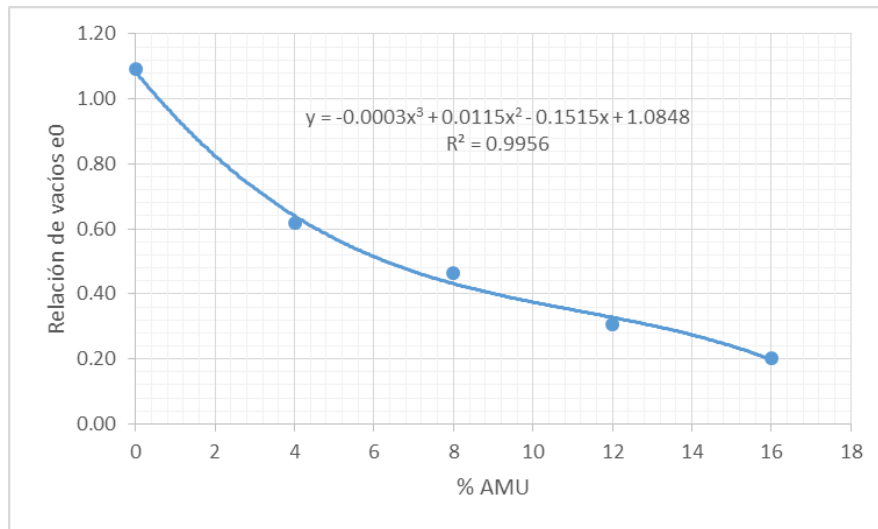
*Ilustración 6-5, Caja de consolidación para 16% de AMU*

Si bien, la variación de permeabilidad es imperceptible, porque, los valores son muy pequeños para este tipo de suelo, porcentualmente hablando, se puede deducir que el aceite, definitivamente tiene un efecto en la permeabilidad del suelo, para evidenciar estos detalles, se presenta la siguiente tabla donde se muestra la variación porcentual respecto al 0% de AMU.

*Tabla 6-1, Variación porcentual de permeabilidad*

Cantidad de AMU (%)	Variación de permeabilidad
4	5.45%
8	-31.54%
12	-25.88%
16	-93.64%

Como se puede analizar, el aceite influye de manera directa en la permeabilidad del suelo, dato que se puede evidenciar si evaluamos el cambio en la relación de vacíos al ser afectados con el AMU, resultados que se evidencian en la siguiente gráfica.



*Ilustración 6-6, Relación de vacíos vs % AMU*

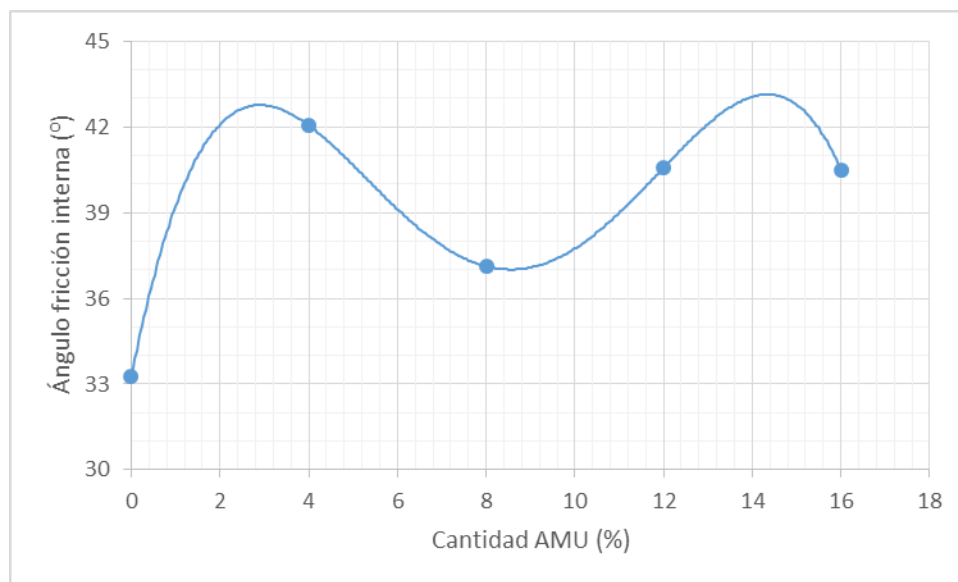
Se aprecia que el volumen de vacíos de la muestra decrece substancialmente a medida de que el aceite aumenta, cambios muy significativos, ya que de 0 a 16% se redujeron hasta un 18.64%, resultados que son congruentes en comparación con las investigaciones previas realizadas, Del Castillo, 2014, encontró que la permeabilidad no varía significativamente, pero, el volumen de vacíos decrece al adicionar aceite, llegando a perder el 69% de aire para una dosificación de 16%, Rahman, y otros, 2010, sugieren que en suelos residuales (MH), al incrementar el aceite el espacio entre partículas se reduce impidiendo la filtración del agua, Khamsehchiyan, y otros, 2006, trabajaron con el crudo de petróleo y suelos (CL SM y SP) demostrando una relación inversa entre la permeabilidad y el contenido de crudo y una relación directa entre permeabilidad y el tamaño de las partículas, sin embargo el cambio en la permeabilidad no fue significativo, ni si quiera para el 16%; Señalaron que la reducción de la permeabilidad es más evidente en las arenas, Silvestry, y otros, 1997, encontraron que un suelo con un alto porcentaje de partículas de arcilla, no disminuye significativamente la permeabilidad con el contenido de aceite. Sin embargo, el tipo de estructura del suelo causado por el contenido de humedad es el principal factor que influye en la permeabilidad.

Al parecer, aunque el aceite reduce el bajo volumen de vacíos de este tipo de suelo, no se presenta un cambio del coeficiente de permeabilidad, debido al tipo de estructura causado por el contenido de humedad al que se remoldearon las muestras (Del Castillo, 2014).

## 6.4 Ángulo de fricción interna

Esta propiedad fue extraída mediante ensayos de resistencia a corte directo, obteniendo resultados muy por encima de los que se acostumbra a tener para este tipo de suelos (MH),

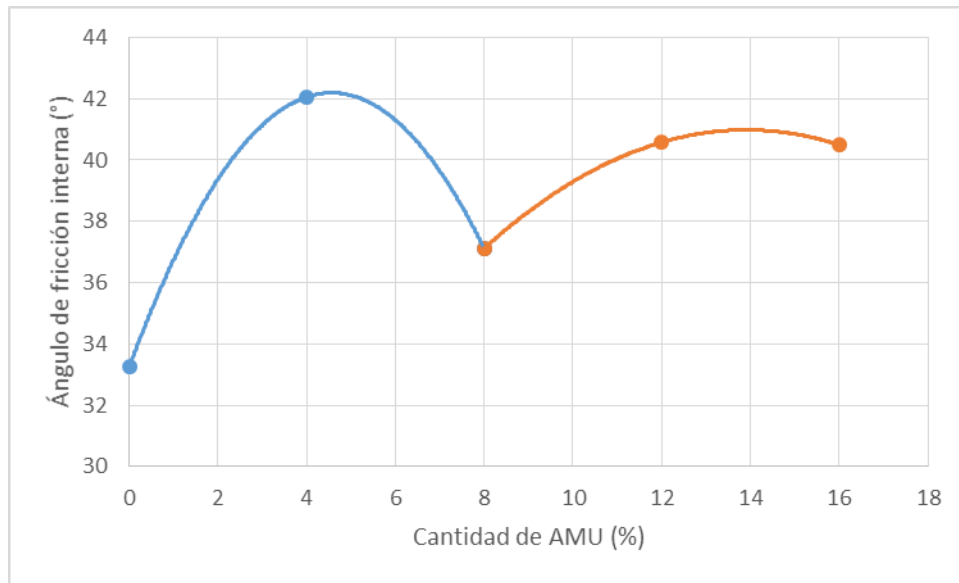
porque, se realizó una compactación con bastante firmeza, para llegar al 95% de densidad seca máxima, si bien, los resultados obtenidos son para las condiciones ideales, la comparación se puede realizar, ya que todos los porcentajes están en su estado óptimo, se obtiene la siguiente gráfica:



*Ilustración 6-7, Variación del ángulo de fricción respecto a la cantidad de AMU*

Como se puede apreciar, el ángulo obtiene mejorías para todos los porcentajes de aceite, en especial para los valores de 4, 12 y 16% de AMU, porque, en estos porcentajes se puede apreciar un aumento de más del 20% y en cuanto al 8% de AMU encontramos un crecimiento del 12%, esto se debe a que, el aceite facilita la acomodación entre las partículas y por el proceso de compactación utilizado, la muestra tiende a densificarse. Si bien no se puede establecer una relación directa o inversa, se tiene una aproximación polinómica de cuarto orden que describe la siguiente ecuación:  $\phi' = -0.0055AMU^4 + 0.1907AMU^3 - 2.0962AMU^2 + 7.8872AMU + 33.261$ ; para un factor de ajuste  $R^2 = 1$ .

Al interpretar el comportamiento de la gráfica, se determina que la línea que une dichos puntos tiende a hacer un movimiento similar de 0% a 8% AMU y de 8% a 16%, por lo tanto, vale la pena analizar cada espacio por separado y de esta manera deducir el porqué del comportamiento del suelo al ser sometido bajo la acción del aceite.



*Ilustración 6-8, Análisis del ángulo de fricción interna*

En la gráfica se aprecia dos respuestas, para dos diferentes fases una húmeda (0-8% AMU) y una seca (8-16% AMU). La variación es más notoria para la primera fase, representada de azul, y tiene una variación cuadrática de la forma  $\phi' = -0,4291AMU^2 + 3.9147AMU + 33,261$ . Para un porcentaje del 4% se notó un incremento considerable en esta propiedad, se puede decir que este contenido de aceite afecta negativamente la tensión superficial del suelo, ya que el CBR y la cohesión, mostrada más adelante (ver Ilustración 6 – 9), que son propiedades que prueban la resistencia superficial del suelo, disminuyen. Pero, por otro lado, el ángulo de fricción interna aumenta, esto también es considerable, porque, al tratarse del mismo suelo lo más común, es que, al disminuir la cohesión el ángulo de fricción aumente y viceversa.

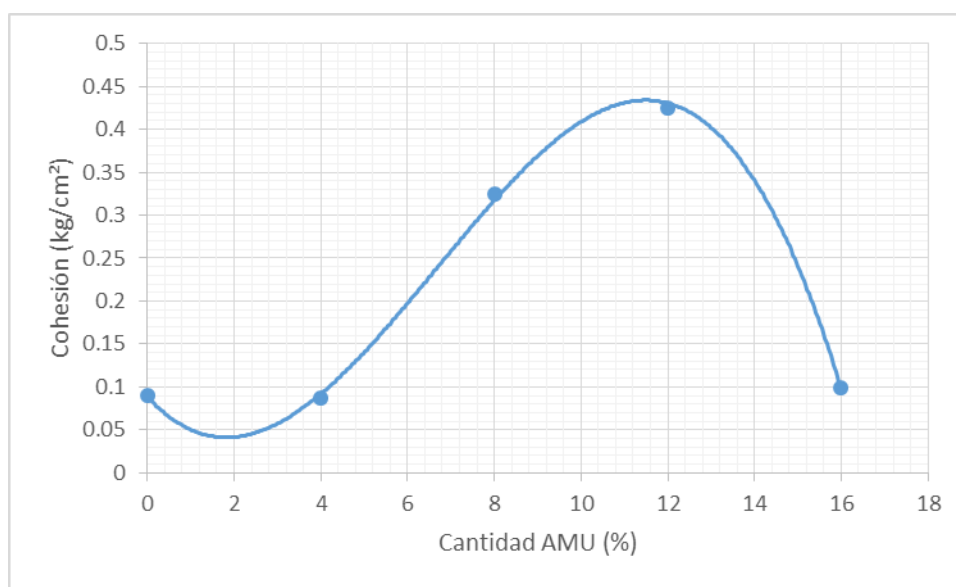
Para el 8% de aceite ocurre algo similar a lo anteriormente mencionado, aumenta la cohesión y en ángulo tiende a disminuir, para este porcentaje. Luego crece y tiende a estabilizarse, pero, esta vez lo hace describiendo la siguiente ecuación cuadrática:  $\phi' = -0.1107AMU^2 + 3.0784AMU + 19.575$ ; para el 12 % de AMU el ángulo crece de nuevo y hasta llegar al 16 % obtiene su pico en 14 % por lo que se estima que cerca de este valor este el porcentaje ideal, basados también en la prueba de CBR, la Ilustración 6 – 4 muestra claramente como el CBR alcanza el valor de la muestra sin aceite. Para el 16% el valor se mantiene similar al 12 %, se podría decir que el valor continúa constante, pero, debe continuar describiendo la parábola, porque, una saturación de aceite de más de 16 % no permitiría la fricción entre partículas sólidas de un suelo y finalmente, ese ángulo sería cero o muy bajo.

Khamehchiyan, y otros, 2007 encuentran una relación directa entre el ángulo de fricción interna y el contenido de aceite para suelos de tipo CL y una relación inversa para SM y SP,

por esta razón, se atribuye el efecto al tipo de suelo (Fino y granular) y no a la contaminación; sin embargo, se ve una notable mejora para todos los porcentajes de AMU, en especial de 12 a 15 %;coincidiendo con el aumento que se obtuvo en este trabajo de grado. Ratnaweera, y otros, 2005, sostienen La lubricación al contacto de las partículas es causada por la naturaleza viscosa del fluido de poro. Un aumento en la viscosidad del fluido de poro cambia las propiedades de los contactos de fluido mineral a poroso, mostrando así el ablandamiento del comportamiento de tensión-deformación; Nazir, 2012, Encontró una relación inversa entre la cantidad de petroleo y el ángulo de fricción interna para suelos colapsables de Egipto.

## 6.5 Cohesión

Esta propiedad se obtiene al unir con una línea los puntos de esfuerzo máximo de corte vs esfuerzo normal, el valor que se obtiene al cortar el eje “Y” con dicha línea es el perteneciente a la cohesión, por ser un ensayo de corte directo consolidado drenado, se habla de una cohesión efectiva, ya que, durante este ensayo se pierde el esfuerzo del agua mediante el drenaje, entonces, el esfuerzo que se tiene en consideración es solamente el de la muestra.



*Ilustración 6-9, Variación de la cohesión respecto a la cantidad de AMU*

Como se puede apreciar en la gráfica la cohesión es un valor que permanece constante para cantidades de 0, 4 y 16 % de AMU y tiene un alza muy considerable para los porcentajes de 8 y 12 %. Se observa un ligero incremento del índice de plasticidad con el aumento del contenido de aceite después del 8% de la dosificación, mientras que para el 4% y 8% se

mantuvo relativamente constante (Del Castillo, 2014) al incrementarse el índice de plasticidad para el 8 y 12% de aceite, tenemos que la cohesión tiende a aumentar, ya que, el rango de humedad para que el suelo se plastifique es mayor; esto se debe a que el aceite se mezcla con el suelo seco hasta formar una película uniforme y luego se añade agua hasta llegar a la humedad óptima. La cohesión se ve afectada de nuevo para el 16 % de AMU, porque, el suelo presenta una saturación de aceite muy elevada, de esta manera, el suelo no puede retener de manera óptima el aceite que se le añade, generando que este sea expulsado al entrar en contacto directo con el agua y por su densidad menor, salga flotando a la superficie. Una vez más no se puede tener una relación directa, ni inversa, pero, tenemos una ecuación de tercer orden, que se antoja válida para valores entre 4 y 16% de AMU, porque, como se explica anteriormente la tensión superficial del suelo se ve afectada de manera negativa, cuando, este está sometido bajo la acción del 4% AMU. Ahora se obtiene la siguiente ecuación:  $c' = -0.0009AMU^3 + 0.0174AMU^2 + 0.0547AMU + 0.0885$ , con un valor de  $R^2 = 0.9989$ .

Al consultar investigaciones anteriores ( (Khamsehchiyan, y otros, 2007): (Ratnaweera, y otros, 2005)), concuerdan que se tiene una relación directa entre la cohesión y el porcentaje de material utilizado como agente estabilizante, en los respectivos proyectos citados, cuando se es aplicado en suelos granulares tiende a incrementarse, y Khamsehchiyan, y otros, 2007, encuentran una relación inversa para suelos de tipo CL, suelos finos donde tiende a disminuir. Por otro lado, Nazir, 2012, encuentra un alza en la cohesión muy significativa para el 12% de aceite de motor para suelos colapsables de Egipto clasificados como (CL), trabajando en condiciones no drenadas, quiere decir que la muestra estaba seca, sin embargo, estos resultados se asemejan, ya que, en la presente investigación también notamos el mismo incremento a partir del 8% de aceite de motor usado.

## 7 CONCLUSIONES

En este estudio se trabajó con un suelo típico de Sub-rasante de la ciudad de Cali, clasificado como un Limo de alta plasticidad (MH) según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), se analizó el efecto que tiene el aceite de motor usado (AMU) en propiedades mecánicas del suelo tales como: Relación soporte de California (CBR) y Resistencia al corte directo, además de reincidir en propiedades ya evaluadas como: Densidad seca máxima, Humedad óptima y Permeabilidad. Por medio del ensayo de proctor modificado se obtiene la densidad seca máxima, así como también la humedad óptima de compactación y de hinchamiento, donde se evidencia un incremento notable en la densidad seca al ser mezclada con AMU (hasta un 16%) y una relación inversa entre las humedades óptimas y el porcentaje de AMU en la muestra.

Por medio del porcentaje de CBR se obtiene por correlación el módulo de resiliencia, variable indispensable en el diseño de pavimentos, se presenta una disminución significativa para 4% de AMU (Del 36% Con relación al anterior), luego un incremento progresivo y lineal hasta 12 % de AMU y finalmente un aumento considerable para el 16% de AMU (Del 51% con relación al suelo sin estabilizar).

Para efectos del laboratorio, el resultado para el 16% de AMU es muy bueno, ya que, aporta una enorme mejora, pero, si se desea implementar en construcción, no sería recomendable, puesto que, el aceite no es asimilado por el suelo en su totalidad y esto causa que sea expulsado hacia la superficie, esto se produce, porque la saturación se encuentra por debajo de este porcentual. En este caso se podrían producir afectaciones en las capas superiores del pavimento.

A parte del 16% de AMU la mejor manera de trabajar el suelo sería en su estado natural, porque, el CBR es mayor en este estado, sin embargo, si se desea obtener un mejor rendimiento en cuanto a deformaciones verticales (Contracto-expansión) es viable la opción de usar un 12% de AMU, ya que, con este porcentaje el hinchamiento disminuye notablemente y además la resistencia no se ve tan afectada como en los porcentajes del 4 al 8% de AMU.

La permeabilidad se determinó de manera indirecta y no se halló cambios significativos en cuanto a esta propiedad, porcentualmente hablando para el 16% de AMU se obtuvo una reducción llegando al 6% del valor de la permeabilidad inicial, pero, por ser una variable tan infinitesimal, no es representativo; sin embargo, este cambio tan brusco ayuda a soportar el comportamiento tan variable para este porcentaje en cuanto a las demás propiedades que se evalúan en este trabajo de grado. Por otro lado, el volumen de vacíos decrece con el contenido de AMU en la muestra.



En el ensayo de Resistencia al corte directo, se obtiene un aumento considerable para el ángulo de fricción de todas las muestras en especial para 4, 12 y 16% de AMU (llegando hasta un 27%) y en cuanto a la cohesión, se evidencia constante para valores de 0, 4 y 16% de AMU, mientras que para 8 y 12% de AMU hay una notable mejoría pasando de 0.1 a 0.32 y 0.42 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, por lo tanto se afirma que el valor óptimo se encuentra en el 12 % de AMU, ya que generó un buen ángulo de fricción interna y la mayor cohesión sobre los demás. A pesar de que se presentaron ángulos muy altos para un limo, esto se debe, al proceso de compactación que se le dio en la preparación de las muestras, ya que fueron llevados a la densidad seca máxima.

Tabla 2, Resumen de Conclusiones

Propiedad evaluada	Variación	Discusión	Ecuaciones obtenidas	Error (R <sup>2</sup> )
Densidad seca	La densidad seca aumenta con el contenido de aceite	El aceite es un lubricante que facilita la reacomodación entre partículas sólidas	$\gamma_d = 4E-05AMU - 0,0014AMU^3 + 0,0143AMU^2 - 0,0323AMU + 1,51$	1
Contenido de humedad	La humedad óptima disminuye con el contenido de aceite	El aceite es menos denso que el agua y tampoco se evapora en el horno, por, esto el peso del agua es mucho menor	$W_{opt} = -0,0002AMU^2 - 0,0036AMU + 0,248$	0.9946
CBR	Disminuye para 4% luego aumenta linealmente hasta 12% finalmente crece exponencialmente de 12 a 16%	La cantidad de agua que pueda transitar por el suelo incide en la resistencia a la penetración de la muestra, así como en su comportamiento.	De 0 a 16 % AMU $\Rightarrow CBR = 0.000AMU^4 - 0.0238AMU^3 + 0.2674AMU^2 - 1.1625AMU + 4.7$	1
			De 4 a 12 % AMU $\Rightarrow CBR = 0.1188AMU + 2.5167$	0.9991
Permeabilidad	No tiene una variación significativa, salvo para el 16 % de aceite donde se reduce hasta en un 94% con respecto al suelo natural	El tiempo de consolidación es muy corto para este tipo de suelo y hasta para el 12% de AMU, pero, para el 16% se vuelve un tiempo largo	No obtenida	
Ángulo de fricción interna	Tuvo un comportamiento al alza para todos los porcentajes, dicha variación se dividió en dos, ya que presentaban simetría en su comportamiento	La mayoría de valores aumentan en igual magnitud respecto al suelo natural, salvo para el inicio de la fase húmeda, esto se debe a la tensión superficial que disminuye para el 8%.	De 0 a 8% AMU $\Rightarrow \phi' = -0,4291AMU^2 + 3,9147AMU + 33,261$	1
			De 8 a 12% AMU $\Rightarrow \phi' = -0,1107AMU^2 + 3,0784AMU + 33,261$	1
Cohesión	La cohesión se mantiene constante, salvo para 8 y 12% donde se incrementó de una manera adecuada	El rango que tiene el suelo para ser plástico es mayor para los porcentajes 8 y 12 % quizá esto le dé la capacidad para mejorar su cohesión,	$c' = -0.0009AMU^3 + 0.0174AMU^2 + 0.0547AMU + 0.0885$	0.9989

## **8 RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Se recomienda evaluar la incidencia del aceite de motor usado en otro tipo de suelos, ya que en esta investigación solo se usó un limo de alta plasticidad (MH) de manera que, sería interesante analizar la reacción de este material estabilizante frente a otro tipo de suelos.

Ya que el aceite es un material altamente contaminante y en grandes dosificaciones puede desprenderse del suelo, si la humedad no es la adecuada, se recomienda evaluar la incidencia del aceite a largo plazo.

Como el uso de este material estabilizante se antoja usar en pavimentos, sería conveniente evaluar, la incidencia del aceite en suelos granulares de tipo Sub-base, ya que en la prueba de CBR se evidenció que el aceite puede salir por medio del empuje del agua, sería interesante analizar la incidencia que el AMU causaría al entrar en contacto con las capas granulares.

Cuando se trabaja con altas dosificaciones de AMU (12 y 16 %), estudiar la posibilidad de contener el aceite dentro de la muestra, para que no se produzcan derrames, ya que para estos valores las propiedades como el CBR, cohesión y ángulo de fricción interna obtienen su mejoría óptima.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

*Aceite usado generado por motores en la ciudad de Cali. Alternativas de uso.* **Núñez, María Eugenia. 2001.** Cali : s.n., 2001, Revista de subproductos industriales en Colombia.

**Aiban, Saad A. 1998.** *the effect of temperature on the engineering properties of oil-contaminated sands.* usa : Elsevier Science Ltda, 1998. 153-161.

**Behak, Leonardo. 2008.** *Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cascara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación.* 2008.

**Chen, Wai-Fah y O, McCarron William. 1991.** *foundation engineering handbook.* new york : hsai-yang fang, 1991. TA775.F665.

**Del Castillo, Ruben. 2014.** *Investigación exploratoria sobre el efecto del aceite de motor usado en un suelo de subrasante.* Santiago de Cali : s.n., 2014.

**Fonseca, Alfonso Montejo. 2002.** *Ingeniería de pavimentos para carretera Tomo I.* Bogotá : Stella Valbuena de Fierro, 2002.

**INGEOMINAS. 2002.** *Investigaciones y zonificación geotécnica.* Santiago de Cali : DAGMA, 2002.

**INVIAS. 2007.** *INV E - 123. Análisis granulométrico de los suelos por tamizado.* 2007.

—. **2007.** *INV E - 125. Determinación del límite líquido de los suelos.* 2007.

—. **2007.** *INV E - 126. Límite plástico e índice de plasticidad de suelos.* 2007.

—. **2007.** *INV E - 128. Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral.* 2007.

—. **2007.** *INV E - 142. Relaciones de humedad - masa unitaria seca en los suelos (Ensayo modificado de compactación).* 2007.

—. **2007.** *INV E - 148. Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio).* 2007.

—. **2007.** *INV E - 151. Consolidación unidimensional de los suelos.* 2007.

—. **2007.** *INV E - 154. Determinación de la resistencia al corte método de corte directo (CD) (Consolidado Drenado).* 2007

**.Juárez Badillo, Eulalio y Rodríguez, Alfonso R. 1980.** *Mecánica de los suelos - Tomo I.* Mexico DC : LIMUSA, 1980.

**Khamehchiyan, Mashalah, Hossein Charkhabi, Amir y Tajik, Majid. 2006.** *Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils.* 2006.

—. **2007.** *Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils.* Tehran - Iran : Engineering Geology, 2007. 89 (2007) 220-229.

—. **2006.** *The effects of crude oil contamination on geotechnical properties of Bushehr coastal soils in Iran.* 2006.

**Nazir, Ashraf K. 2011.** *Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay.* 2011.

—. **2012.** *Stabilization of collapsible soil with engine oil.* 2012.

**Ojuri, Oluwapelumi. O. y Ogundipe, Omotayo. O. 2012.** *Modeling Used Engine Oil Impact on the Compaction and Strength Characteristics of a Lateritic Soil.* Akure : Bund X, 2012.

**Rahman, Zulfahmi Ali, y otros. 2010.** *Influence of oil contamination on geotechnical properties of basaltic residual soil.* 2010.

**Ratnaweera, Prasanna y Meegoda, Jay N. 2005.** *Shear Strength and Stress-Strain behavior of Contaminated Soils.* s.l. : Geotechnical Testing Journal, 2005.

**Rodríguez, Alfonso Rico. 1974.** Planteamiento teórico del problema del flujo de agua en suelos. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas.* s.l. : México: Limusa, 1974, pág. 387.

**Rondón Quintana, Hugo A, D, Fernández Gómez Wilmar y A, Hernández Noguera Jesús. 2013.** *Influencia de la Rigidez de la subrasante y las Capas Granulares sobre la Vida a Fatiga de Mezclas Asfálticas.* Medellín : TecnoLógicas, 2013. ISSN 0123-7799.

**Silvestry, Vincent, Mikhail, Nabil y Soulié, Michel. 1997.** *Permeability response of oil-contaminated compacted clays.* s.l. : American society for testing and materials, 1997.

**Unidad de planeación minero-energética, UPME. 2001.** *Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión.* Bogotá D.C : s.n., 2001.